



TRABAJO FIN DE MÁSTER

INGENIERÍA CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON SISTEMA DE RECUPERACIÓN ENERGÉTICA A PARTIR DEL BIOGÁS GENERADO Y SUPLEMENTO CON ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTÁICA

Alumno: Javier García García

Tutor: Dr. Juan Tomás García Bermejo



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
MEMORIA	11
1 Estructura del TFM	12
2 Objetivo del proyecto.....	12
3 Alcance del proyecto	13
4 Marco legal.....	14
5 Descripción de Procesos en la E.D.A.R.	15
5.1 Línea de Agua	16
5.1.1 Obra de llegada	17
5.1.1.1 Pozo de gruesos.....	17
5.1.1.2 Desbaste de Gruesos	18
5.1.1.3 Pozo de bombeo.....	18
5.1.2 Pretratamiento	19
5.1.2.1 Desbaste de finos	20
5.1.2.2 Desarenador – Desengrasador aireado.....	20
5.1.2.3 Tanque de Homogeneización	23
5.1.3 Tratamiento primario	23
5.1.4 Tratamiento secundario	27
5.1.4.1 Descripción básica del proceso bioquímico	27
5.1.4.2 Bases de diseño del Reactor Biológico	33
5.1.4.3 Decantador secundario	39
5.1.5 Tratamiento terciario	41
5.1.5.1 Decantación de materia coloidal.....	42
5.1.5.2 Filtración por arena	47
5.1.5.3 Desinfección	49
5.1.6 Régimen Hidráulico la E.D.A.R.....	53
5.1.6.1 Tipos de pérdidas de carga.....	56



5.2	Línea de fango	56
5.2.1	Espesador por Flotación	58
5.2.2	Estabilización mediante Digestión Anaerobia	60
5.2.2.1	Descripción básica de proceso [1, p. 657]	60
5.2.2.2	Proceso UASB	62
5.2.2.3	Calefacción del reactor	65
5.2.3	Acondicionamiento, deshidratación y almacenamiento de fangos	66
5.2.3.1	Acondicionamiento químico.....	66
5.2.3.2	Deshidratación mediante decantación por centrifugado	66
5.2.3.3	Almacenamiento de fango	68
5.3	Línea de gas	69
5.3.1	Producción de gas	70
5.3.2	Recogida y Almacenamiento del gas	70
5.3.3	Pretratamiento del gas	72
5.3.3.1	Eliminación de humedad	72
5.3.3.2	Eliminación de Sulfuro de Hidrógeno	73
5.3.3.3	Eliminación de Siloxanos [1, p. 1523]	73
5.3.4	Cogeneración energética [1, p. 1524]	74
5.3.4.1	Poder calorífico.....	74
6	Generación de Energía Eléctrica.....	75
6.1	Microturbinas	76
6.2	Instalación solar fotovoltaica	77
6.2.1	Espacio disponible	78
6.2.2	Configuración eléctrica de la instalación	78
6.2.3	Descripción de los equipos	79
6.2.3.1	Módulos fotovoltaicos.....	79
6.2.3.2	Inversores	80
6.2.3.3	Monitorización	80



6.2.3.4	Protecciones	81
6.2.4	Producción energética esperada	82
6.3	Estimación de balance energético	84
7	Instrumentación y Control de Planta	84
8	Resumen de Datos de la E.D.A.R.	86
9	Conclusiones.....	87
	Referencias Citadas	87
	ANEJOS	91
1	Estado del arte en el diseño EDAR y tendencias de futuro	92
1.1	Estado del arte.....	92
1.2	Tendencias de futuro	96
2	Parámetros de diseño obtenidos de los estudios de soluciones previas.....	97
3	Características mínimas para la reutilización de acuerdo con el RD 1620-2007	99
3.1	Contratos de cesión de derechos sobre aguas regeneradas.....	100
3.2	Procedimiento para la reutilización de aguas depuradas	100
3.3	Frecuencia mínima de muestreo y análisis de parámetros.....	100
4	Plan de control de calidad sanitario	101
4.1	Puntos de control y tipos de control de la EDAR.....	101
4.1.1	Controles de comprobación	102
4.1.1.1	Control Físicoquímico	102
4.1.1.2	Control Microbiológico.....	104
4.2	Control de Auditoría.....	105
4.3	Control y Registro de muestras	105
4.4	Métodos de análisis.....	106
4.5	Criterios de cumplimiento.....	106
4.6	Diferencias en el programa de control sanitario.....	107
4.7	dependiendo del periodo de tratamiento	107
5	Cálculos justificativos del diseño propuesto	108



5.1	Obra de llegada	108
5.2	Pretratamiento	109
5.3	Decantación primaria	111
5.4	Reactor biológico.....	112
5.4.1	Cálculo según modelos cinéticos.....	112
5.4.1.1	Eliminación de materia orgánica	112
5.4.1.2	Nitrificación	113
5.4.1.3	Desnitrificación.....	115
5.4.1.4	Eliminación de fósforo.....	115
5.4.2	Cálculo según modelos empíricos	116
5.5	Decantación secundaria	117
5.6	Coagulación, floculación, decantación terciaria.....	117
5.7	Filtro de arena	118
5.8	Desinfección	119
5.9	Espesamiento de fango	120
5.10	Digestión anaerobia	121
5.11	Deshidratación y almacenamiento de fangos	122
5.12	Gasómetro, antorcha y producción de energía eléctrica.....	122
5.13	Línea piezométrica	124
6	Listado de equipos y consumos.....	125
7	Costes de explotación	127
8	Presupuesto de ejecución material.....	128
8.1	Unidades de Proceso	128
01.01	Línea de agua	128
01.01.01	Obra de llegada y pretratamiento.....	128
01.01.02	Tratamiento primario.....	132
01.01.03	Tratamiento secundario.....	133
01.01.04	Tratamiento terciario.....	135



01.02	Línea de fango.....	138
01.03	Línea de gas	140
8.2	Urbanización y Edificación complementaria	143
8.3	Gestión de residuos.....	145
8.4	Puesta en Marcha.....	145
8.5	Seguridad y Salud	145
9	Planos	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fases de diseño de un Proyecto de EDAR	13
Figura 2. Caudales de diseño	16
Figura 3. Esquema de la cabecera de la EDAR,	17
Figura 4. Instalación de reja de gruesos previa al pozo de bombeo. Fuente: Netwater Technology ...	18
Figura 5. Partes del pretratamiento	20
Figura 6. Puente móvil con bomba de succión de arenas y rasquetas de flotantes.	21
Figura 7. Partes y trayectoria de flujo de un desarenador aireado. Tomado de [1, p. 374].	22
Figura 8. Desarenador con canal concentrador de grasas integrado	22
Figura 9. Velocidad de sedimentación de partículas discretas	24
Figura 10. Trayectoria de una partícula con velocidad de sedimentación crítica	25
Figura 11. Sistema de barrido del fango en el fondo y de la espuma en superficie	26
Figura 12. Canales de recogida del efluente clarificado.....	26
Figura 13. Esquema de proceso A ² O	27
Figura 14. Clasificación de microorganismos, tomada de [1, p. 572].	29
Figura 15. Cantidades orientativas de la materia orgánica DQO fraccionada	30
Figura 16. DQO fraccionada en el reactor biológico	30
Figura 17. Transformación del nitrógeno en procesos de tratamiento biológico,	32
Figura 18. Tasas mínimas entre diferentes parámetros y el fósforo	33
Figura 19. Planteamiento esquemático del balance de masas del reactor, tomado de [1, p. 597].....	34
Figura 20. Coeficientes cinéticos típicos para la eliminación de DBO.....	36
Figura 21. Coeficientes cinéticos de diseño para la eliminación de DQO y nitrificación a 20°C.....	37



Figura 22. Rendimiento observado en la eliminación de la DBO	38
Figura 23. Sección tipo de decantador secundario, tomada de ResearchGate.	39
Figura 24. Esquema de tratamiento secundario	40
Figura 25. Planteamiento esquemático del balance de masas en el decantador	41
Figura 26. Proceso de compresión de la doble capa eléctrica	42
Figura 27. Agitador de mezcla lenta en cámara de floculación, tomada de TIMSA.	46
Figura 28. Depósitos de reactivos en cubeto de retención.....	46
Figura 29. Proceso de filtrado (a) y lavado (b) en un filtro de arena.	48
Figura 30. Leyes de reducción de la concentración para distintos tipos de microorganismos.....	50
Figura 31. Disposición inclinada de módulos con lámparas UV en canal abierto.	51
Figura 32. Arqueta de contacto con cloro.....	52
Figura 33. Ejemplo de sección de control	53
Figura 34. Esquema de flujo en un vertedero de pared delgada, tomada de [23, p. 243].	53
Figura 35. Esquema de flujo en caída libre, tomado de [26, p. 192].	55
Figura 36. Representación de la transformación de la energía en un fluido en movimiento.....	56
Figura 37. Esquema de la línea de fango.....	57
Figura 38. Diagrama de flujo en espesador de flotación, tomado de [27, p. 73].....	58
Figura 39. Espesador de fangos por flotación, tomado de [1, p. 1492]	58
Figura 40. Espesador por flotación, tomado de WesTech.	59
Figura 41. Conversión biológica en sistemas anaerobios. Tomado de [28].....	60
Figura 42. Proceso de generación de metano.....	61
Figura 43. Coeficientes cinéticos para reacciones anaerobias, tomados de [1, p. 1093]	62
Figura 44. Esquema de calentamiento del fango.....	65
Figura 45. Sección de centrífuga en operación. Tomado de Alfa Laval.....	67
Figura 46. Datos generales del decantador centrífugo	68
Figura 47. Esquema de la línea de gas y sistema de recuperación de calor, tomado de [32, p. 8].....	69
Figura 48. Gasómetro de membrana, tomado de Biogás Technology.....	71
Figura 49. Configuración esquemática del sistema de manejo de gas, tomada de [28, p. 74].....	72
Figura 50. Esquema general de cogeneración, tomado de.....	76
Figura 51. Resumen de la hoja de datos de la microturbina Capstone C200S. Fuente: Capstone.	76
Figura 52. Cálculo de la inclinación óptima del panel fotovoltaico.....	82
Figura 53. Balance energético mensual entre energía generada y energía demandada.....	84
Figura 54. Interfaz del SCADA.....	85
Figura 55. EDAR Sur (Madrid).....	93



Figura 56. EDAR Besos.....	93
Figura 57. EDAR el Prat.....	94
Figura 58. EDAR la China	94
Figura 59. EDAR Butarque	95
Figura 60. EDAR Galindo.....	95
Figura 61. EDAR Murcia Este	96
Figura 62. Valor límite de concentración de metales pesados en lodos.....	103
Figura 63. Valores límites para cantidades anuales de metales pesados en suelos.	103
Figura 64. Frecuencia de ensayos para reutilización de aguas en agricultura	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valor y ámbito de aplicación de los diferentes caudales de diseño	16
Tabla 2. Equipos en la obra de llegada	17
Tabla 3. Equipos desbaste gruesos.....	18
Tabla 4. Equipos bombeo a pretratamiento	19
Tabla 5. Equipos en el canal de desbaste de finos	20
Tabla 6. Equipos en el desarenador desengrasador	22
Tabla 7. Equipos en el homogeneizador	23
Tabla 8. Equipos decantación primaria	26
Tabla 9. Reactivos utilizados en los procesos de coagulación-floculación.....	44
Tabla 10. Equipos en el proceso de de coagulación-floculación-decantación.....	45
Tabla 11. Valores orientativos de las principales propiedades del filtro de arena	47
Tabla 12. Tamaño de algunas partículas presentes en el agua residual a la llegada al filtro de arena	47
Tabla 13. Equipos en el proceso de filtración por arena	48
Tabla 14. Características de lámpara UV.....	51
Tabla 15. Equipos en el proceso de desinfección.....	52
Tabla 16. Equipos en el espesador por flotación	59
Tabla 17. Gases constitutivos del biogás.....	69
Tabla 18. Datos generales del combustible de la microturbina	77
Tabla 19. Áreas consideradas para la instalación de placas fotovoltaicas	78
Tabla 20. Producción energética diaria expresada en kWh por las placas fotovoltaicas	83
Tabla 21. Resumen EDARS España	92



Tabla 22. Parámetros de diseño fijados por el Estudio de Soluciones Previas	97
Tabla 23. Caudal horario	98
Tabla 24. Niveles de contaminación en al agua residual de entrada a planta	98
Tabla 25. DQO fraccionada.....	99
Tabla 26. Cálculos pozo de gruesos.....	108
Tabla 27. Cálculos desbaste de gruesos	108
Tabla 28. Cálculos pozo de bombeo.....	109
Tabla 29. Cálculos Reja de finos	109
Tabla 30. Cálculos Desarenador-Desengrasador aireado	110
Tabla 31. Cálculos Tanque de homogenización	110
Tabla 32. Cálculos Decantador primario rectangular.....	111
Tabla 33. Cálculo de pérdidas de carga principales	124
Tabla 34. Listado de equipos y consumos.....	125
Tabla 35. Preciario base costes explotación.....	127
Tabla 36. Costes explotación años 1 a 5.....	127

ÍNDICE DE ECUACIONES EMPÍRICAS

Ecuación:	de Rouse	48
de K.M. Yao.....	de Rushton.....	43
de Letterman	de Watson-Chick.....	50
de Monod		35



INTRODUCCIÓN

Una reflexión acerca del papel de los I.C.C.P. en el Diseño, Construcción y Explotación de E.D.A.R.

Cuando se pone el foco en los aspectos técnicos que gobiernan el diseño de una depuradora se puede correr el riesgo de perder la perspectiva del papel del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos en el diseño de estas. Por ejemplo, dejando de lado los procesos físicos sencillos y fijándonos en los procesos bioquímicos, que son el corazón de la depuración, descubrimos que los conocimientos científicos necesarios para comprenderlos totalmente quedan fuera del alcance de los impartidos en la titulación, naturalmente. El diseño e investigación de estos procesos, la cinética de reacciones, la toxicidad derivada de los subproductos generados... quedan dentro del ámbito propio de los Ingenieros Químicos y derivados.

Si nos fijamos en otros puntos clave como son los Equipos Mecánicos o la Automatización y el Control de las plantas modernas nos veremos en la misma tesitura, pero con Ingenieros Industriales e Ingenieros de Telecomunicaciones.

¿Qué queda, por tanto, en el ámbito propio del Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos?, - en mi opinión, la generalidad de la depuradora.

En ese sentido el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos aporta:

- > Visión global, para situar la depuradora en contextos más amplios como la Ordenación Territorial o los Planes Hidrológicos.
- > Capacidad para condensar avances en materia científica y técnica, y concretarlos en diseños funcionales en una ubicación determinada con condicionantes ambientales, topográficos y geotécnicos específicos.
- > Conocimiento experto en materia constructiva.
- > Capacidad para adquirir conocimientos de las disciplinas transversales intervinientes y así poder coordinarlas para la consecución del objetivo global.

Para poder realizar estas aportaciones y mantenerse como actor relevante en el diseño, construcción y explotación de estas Plantas, el Ingeniero de Caminos deberá adquirir una cultura proactiva de formación continua.

Por todo lo anterior, podemos concluir que el papel del ICCP es de *Diseñador general y coordinador de disciplinas específicas*; papel que automáticamente lo cualifica para su construcción y explotación.



Titulación: Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
Asignatura: Trabajo Fin de Máster
Documento: Memoria
Alumno: Javier García García

Universidad Politécnica de Cartagena
Curso: 2020/2021
Fecha: 09-septiembre-21
Página **11** de **145**

MEMORIA



1 ESTRUCTURA DEL TFM

Este Trabajo Fin de Máster consta de los siguientes documentos:

- > **Memoria:** Descripción general del proyecto con el objetivo de aportar visión global.
- > **Anejos:** Descripción detallada de aspectos particulares. Los anejos se encuentran hipervinculados a lo largo del texto de la memoria y se enumeran a continuación:

Los siguientes Anejos complementan y sustentan la presente Memoria:

Anejo Nº	Contenido
1	Estado del arte en el diseño EDAR y tendencias de futuro
2	Parámetros de diseño obtenidos de los estudios de soluciones previas
3	Características mínimas para la reutilización de acuerdo con el RD 1620-2007
4	Plan de control de calidad sanitario
5	Cálculos justificativos del diseño propuesto
6	Listado de equipos y consumos
7	Costes de explotación
8	Presupuesto de ejecución material
9	Planos

2 OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster es el siguiente:

- a) Concebir el diseño de una Estación Depuradora de Agua Residual que cumpla con los requerimientos legales contenidos en el RD 1620/2007, y que funcione como un sistema de recuperación de energía y recursos, utilizando para ello la energía disponible en el biogás de EDAR y la energía solar fotovoltaica.

Adicionalmente, se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- b) Recoger la Normativa de aplicación, nacional e internacional, en el diseño de EDAR.
- c) Estudiar el diseño del reactor biológico utilizando modelos cinéticos y empíricos. Ajustar los valores de los parámetros bioquímicos de los modelos cinéticos para hacer coincidir el diseño con el obtenido según modelos empíricos y estudiar si estos valores quedan dentro del rango recogido en la bibliografía.
- d) Calcular el coste de ejecución y el coste de explotación del diseño, en base a los precios actuales.



- e) Analizar el estado del arte en el diseño de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales Urbanas.
- f) Identificar tendencias de futuro en el diseño EDAR, así como nuevas oportunidades derivadas de la concepción de EDAR como *biofactorías*.

3 ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance de este proyecto cubre el diseño de la EDAR hasta un nivel de ingeniería conceptual. Es decir, se aporta la visión de conjunto y la solución de proceso de la EDAR a partir de los datos básicos proporcionados en los Estudios de Soluciones Previas. No se entra, por tanto, en detalles de cálculo estructural, diagramas unifilares, P&ID o urbanización.

Tradicionalmente, el objetivo de la fase de Ingeniería Conceptual es alcanzar un nivel de definición del proyecto que permita acotar el coste de ejecución con un margen del $\pm 30\%$.

En la [Figura 1](#) se enmarca la fase de Ingeniería Conceptual dentro de las 4 fases clásicas de diseño de un proyecto.

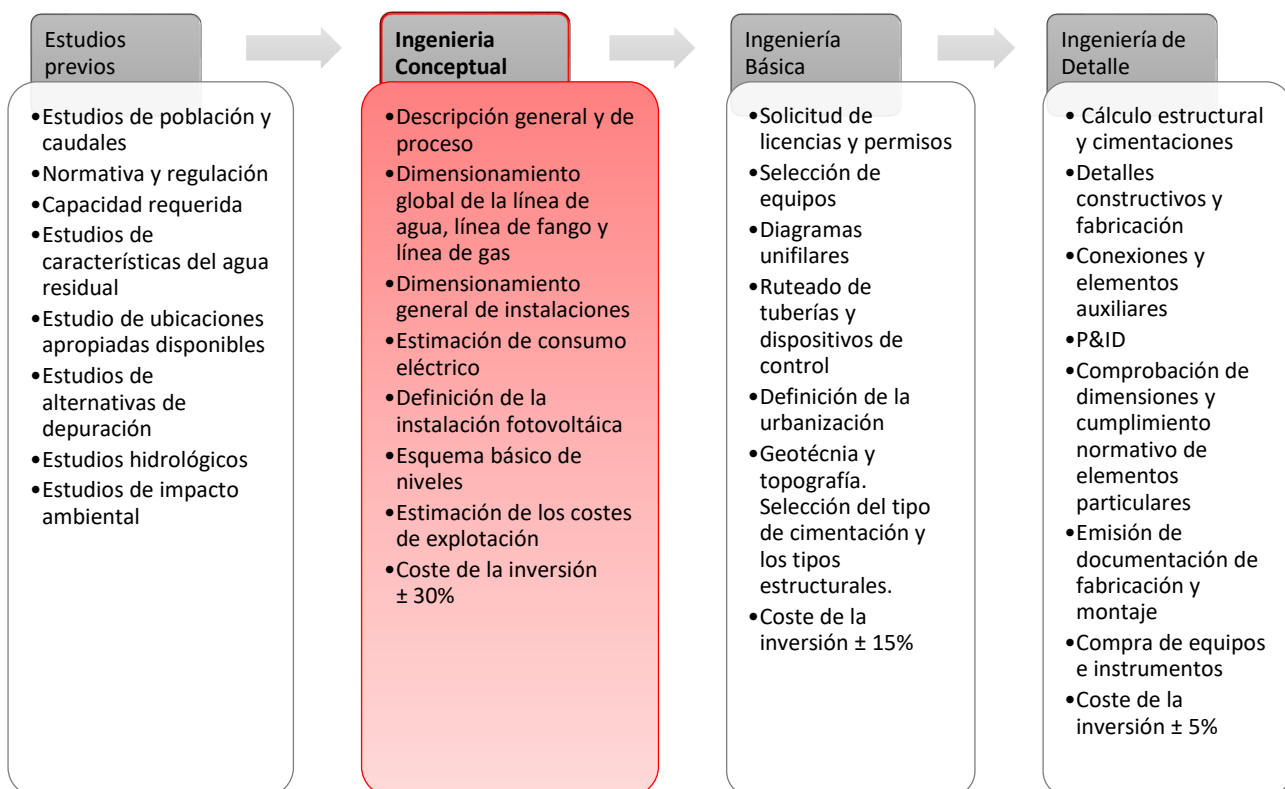


Figura 1. Fases de diseño de un Proyecto de EDAR



4 MARCO LEGAL

A continuación, se recoge la Normativa Nacional de obligado cumplimiento en el diseño, construcción y explotación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR).

Agua

Real Decreto, 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las Normas Aplicables al Tratamiento de las Aguas Residuales Urbanas

Real Decreto 2116/1998, de 2 de octubre, por el que se modifica el Real Decreto 509/1996, de 15 de marzo, de desarrollo del Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Real Decreto 995/2000, de 2 de junio, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.

Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.

Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.

Cogeneración

Real Decreto Nº 616/2007 - Fomento de la cogeneración.

Real Decreto 56/2016, de 12 de febrero, por el que se transpone la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción de la eficiencia del suministro de energía.

Hoja de ruta del biogás - MITECO¹

Construcción

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

Contaminación atmosférica

Ley 34/2007, de 15 de noviembre de calidad del aire.

Electricidad

R.D.3275/1982, de 12 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en centrales eléctricas, subestaciones y centros de transformación.

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión.

Real Decreto 1183/2020, de 29 de diciembre, de acceso y conexión a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

Fango

¹ <https://energia.gob.es/es-es/Participacion/Paginas/DetalleParticipacionPublica.aspx?k=437>



Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regulan utilización de los lodos de depuración en el sector agrario

Decreto 167/2005, de 12 de julio, por el que se modifica el Decreto 281/2002, de 12 de noviembre, por el que se regula la autorización y control de los depósitos de efluentes líquidos o de lodos procedentes de actividades industriales, mineras y agrarias

Residuos

Ley 10/1998, de 21 de abril, de Residuos

Ruido

Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.

Seguridad Industrial

Real Decreto 2267/2004, de 3 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales

Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.

Seguridad Laboral

R.D. 1403/1986 sobre el estudio de seguridad e higiene en el trabajo.

Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.

5 DESCRIPCIÓN DE PROCESOS EN LA E.D.A.R.

La operación de una EDAR con las características recogidas en el Anejo 3 genera tres productos: agua depurada, fango y gas; por tanto, a nivel general, la EDAR se esquematiza en tres partes o líneas interconectadas:

> **Línea de Agua:**

- Obra de llegada y pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario
- Tratamiento Terciario
- Emisario

> **Línea de Fangos:**

- Recogida de los fangos producidos en la línea de agua
- Espesamiento
- Estabilización
- Deshidratación
- Producción de biosólidos



- Almacenamiento y expedición

> **Línea de Gas**

- Recogida del gas generado en la digestión
- Limpieza de gas
- Combustión para generación de energía eléctrica o en antorcha

5.1 LÍNEA DE AGUA

El objetivo de la línea de agua es reducir la contaminación por debajo de los límites establecidos en la Normativa. Dicho objetivo se logrará mediante una serie de tratamientos, que se describen en los siguientes epígrafes, que irán aumentando el nivel de purificación del agua residual.

Según los datos recogidos en el Anejo 3, la línea de agua se dimensiona para un caudal medio de 20.000 m³/día, valor que representa el consumo de unos 187.000 habitantes equivalentes. Se toma un factor punta igual a 2. En base a las variaciones de caudal observadas a lo largo del día, se obtienen cuatro caudales de diseño que se utilizarán para dimensionar las diferentes partes de la EDAR. La caudal punta es el medio multiplicado por el factor punta.

Tabla 1. Valor y ámbito de aplicación de los diferentes caudales de diseño

Tipo	Valor [m ³ /h]	Uso
Q _{punta}	1667,27	Cálculo de pérdidas de carga y capacidad hidráulica.
Q _{máx}	1025,42	Verificación de TRH mínimos, velocidades ascensionales máximas etc.
Q _{med}	833,63	Consumo de reactivos, producción de fangos.
Q _{min}	428,67	Optimización bombeo. Capacidad mínima.

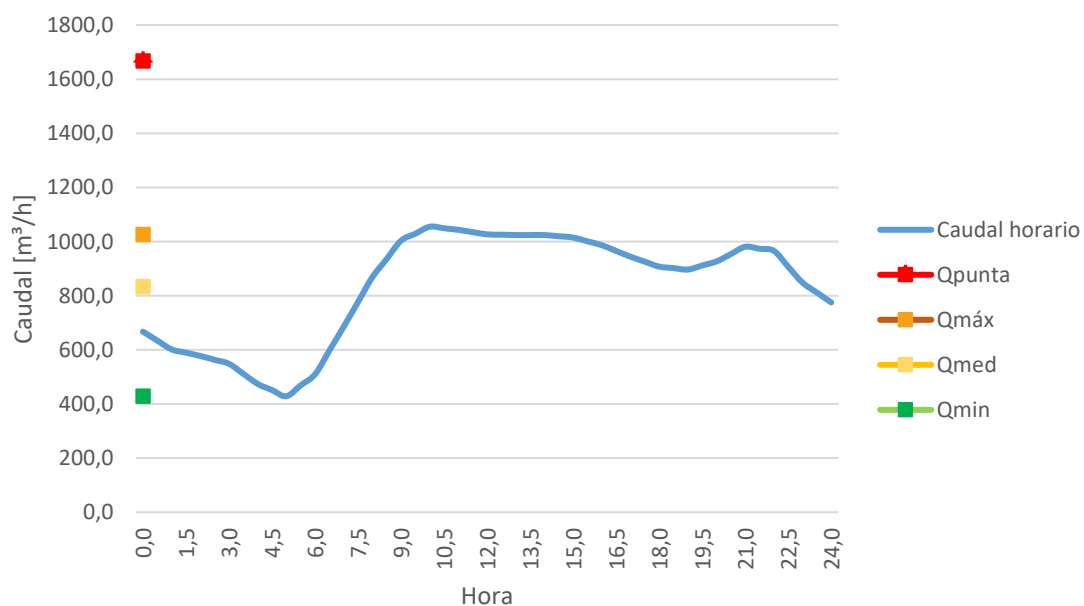


Figura 2. Caudales de diseño



5.1.1 OBRA DE LLEGADA

La obra de llegada de la EDAR es la responsable de recibir y acondicionar las aguas residuales para su posterior bombeo al pretratamiento. La obra de llegada está formada por:

- > Pozo de gruesos
- > Desbaste de gruesos
- > Pozo de bombeo

A continuación, se describe pormenorizadamente cada una de estas partes.

5.1.1.1 POZO DE GRUESOS

El objetivo del pozo de gruesos es recoger los sólidos de mayor tamaño (gravas y arenas de diámetro elevado, trapos etc.) que llegan de la red de alcantarillado. El pozo de gruesos consiste en un ensanchamiento de la sección del canal de llegada que facilita la deposición de los elementos en suspensión de mayor tamaño.

Este pozo presenta un fondo tronco-piramidal invertido y paredes muy inclinadas con el fin de facilitar la extracción de los residuos mediante cucharas bivalvas de accionamiento electrohidráulico unidas a polipastos o puentes-grúa, sostenidas por una estructura.

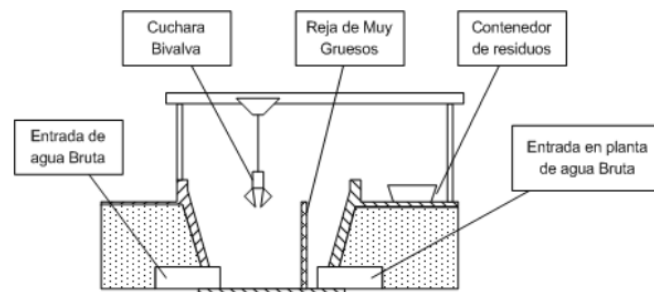


Figura 3. Esquema de la cabecera de la EDAR, con el pozo de gruesos justo antes de la reja de gruesos. Fuente: Apuntes de Ing. Sanitaria

Previamente al pozo de gruesos, en el colector de llegada, se instalará un caudalímetro Doppler para lámina libre. Para recoger los gruesos que llegan de la red de alcantarillado se ha seleccionado una cuchara bivalva de 250 litros de capacidad, modelo CBV-250 de Hidrometálica o similar.

Tabla 2. Equipos en la obra de llegada

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Caudalímetro Doppler	0,0006	6870,00
Cuchara bivalva	1,5	12000,00
Polipasto 2 Tn	2,5	2500,00



5.1.1.2 DESBASTE DE GRUESOS

El desbaste de gruesos se sitúa justo antes del pozo bombeo. Consiste en una reja vertical con separación de barrotes 2,5 centímetros y limpieza automática.



Figura 4. Instalación de reja de gruesos previa al pozo de bombeo. Fuente: [Netwater Technology](https://www.netwater-technology.com/)

Tabla 3. Equipos desbaste gruesos

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Reja gruesos automática	4	2x8500
Cinta de recogida automática	1	3000

5.1.1.3 POZO DE BOMBEO

En el pozo de bombeo se situará el grupo de bombas que elevará el agua a una altura suficiente para que el flujo hasta el filtro de arena se produzca por gravedad.

Cada bomba es capaz de elevar un caudal máximo de 810 m³/h a una altura de 8 metros, por lo que se disponen 2 bombas, más 1 de reserva (3 bombas).

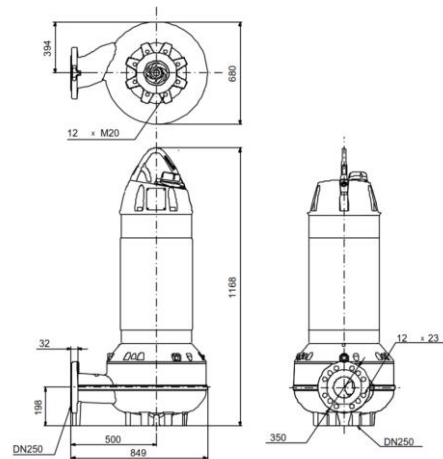


Tabla 4. Equipos bombeo a pretratamiento

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Bomba sumergible	3x16	3x20602

5.1.2 PRETRATAMIENTO

Los objetivos del pretratamiento son:

- > Evitar que los sólidos de tamaño superior a 0,2 mm lleguen al tratamiento primario
- > Homogeneizar la masa de agua
- > Controlar y rectificar el PH del agua

La influencia directa del pretratamiento en la consecución del objetivo de calidad del efluente es prácticamente nula (véase la tabla 5-6 de [1, pp. 195, 3ª edición]), pero es fundamental para el correcto desarrollo de los procesos subsiguientes. El pretratamiento cuenta con las siguientes partes:

- > Canales de desbaste
- > Desarenador
- > Tanque de homogeneización

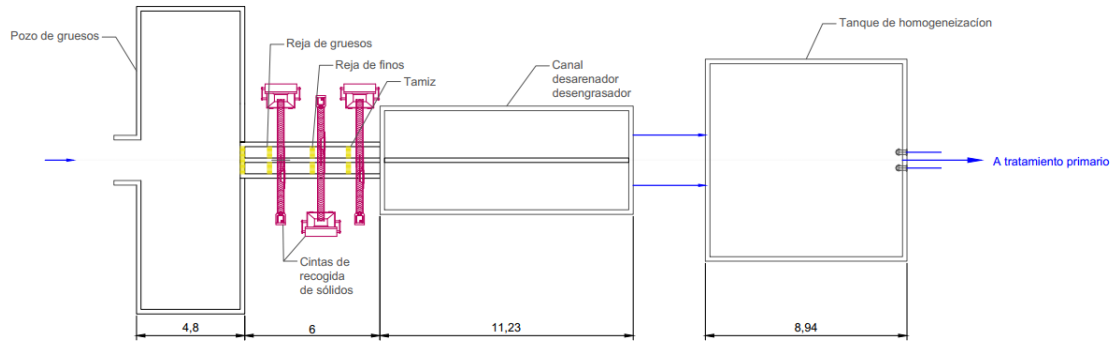


Figura 5. Partes del pretratamiento

A continuación, se describe cada una de las partes que conforman el pretratamiento. Los cálculos detallados se encuentran en el Anejo 5 de esta Memoria.

5.1.2.1 DESBASTE DE FINOS

Se lleva a cabo mediante rejillas cuyo objetivo es retener objetos de tamaño superior a 3 mm que son arrastrados por el agua.

Se contempla la instalación de 2 líneas de desbaste más 1 de reserva, instalándose en cada una de las líneas una rejilla de finos con una apertura de 6 milímetros.

La entrada de agua a los canales de desbaste estará regulada por compuertas motorizadas.

Tabla 5. Equipos en el canal de desbaste de finos

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Reja de finos de limpieza automática	3x0,75	3x8500
Compuerta motorizada	3x1	3x2500
Cinta de recogida automática	1	3000

5.1.2.2 DESARENADOR – DESENGRASADOR AIREADO

El objetivo del desarenador es sedimentar partículas discretas (arenas) y recogerlas para su posterior clasificación. El desengrasador eliminará por arrastre las grasas y aceites.

La sedimentación de las partículas discretas sigue la ley de Stokes que describe la velocidad de caída de una partícula esférica.

$$w = \left[\frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot D^2}{18\nu\gamma} \right]$$



En el desarenador – desengrasador se disminuye la velocidad de flujo y se provoca que las partículas en suspensiones más pesadas se depositen en el fondo (proceso de desarenado), y una eliminación de las grasas, aceites, espumas y restantes materiales flotantes más ligeros que el agua residual.

El canal de desarenado-desengrasado estará provisto de un puente móvil o puente barredor que se apoya en sus laterales, equipado con rasquetas para la recogida de los flotantes. Las arenas se irán depositando por gravedad en el fondo del desarenador-desengrasador y serán retiradas gracias a una bomba que succionará la mezcla.

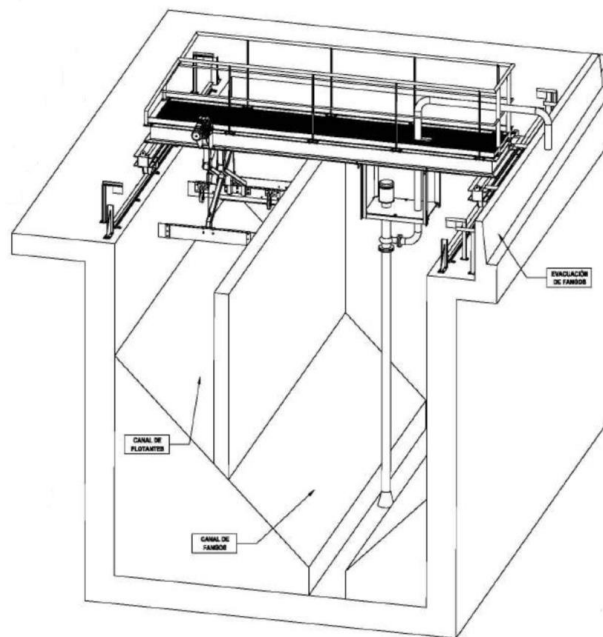


Figura 6. Puente móvil con bomba de succión de arenas y rasquetas de flotantes. Tomado de [Deyma La Mancha S.L.](#)

Respecto a las grasas, el concentrador de grasas y flotantes estará diseñado para recoger la mezcla de aguas y grasas eliminada por el Desarenador-Desengrasador y reducir su contenido en humedad para permitir su eliminación a vertedero y reducir costes en el transporte por disminución de volumen.

Los difusores de aire se sitúan en uno de los laterales del tanque a una distancia entre 0,5 y 0,9 metros sobre el suelo. Con el flujo adecuado de aire se consiguen dos objetivos:

- > Generar un patrón de flujo en espiral, lo cual favorece la decantación pues las partículas permanecen más tiempo en el tanque hasta llegar al final de este. Véase la [Figura 7](#).
- > Separar la materia orgánica de la arena, lo cual posibilitará tener una arena limpia sin potencial de putrefacción.



Tabla 6. Equipos en el desarenador desengrasador

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Puente móvil	1,5	15000
Soplantes	12	5000
Bomba succión de arenas	20	10000

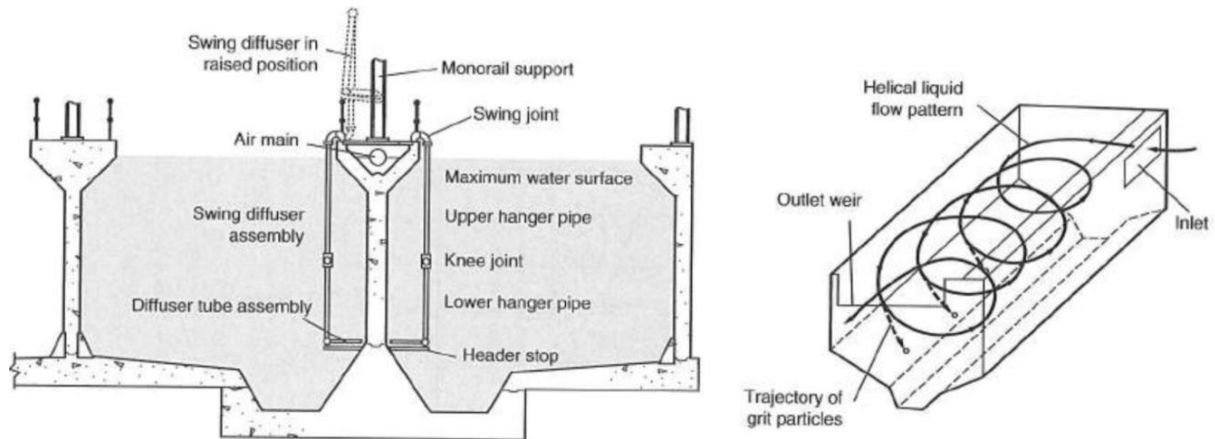


Figura 7. Partes y trayectoria de flujo de un desarenador aireado. Tomado de [1, p. 374].



Figura 8. Desarenador con canal concentrador de grasas integrado a la derecha de la imagen. Obsérvese cómo la aireación situada a la izquierda va desplazando lías espumas y grasas hacia la derecha. Imagen tomada de [TEQMA](#)



5.1.2.3 TANQUE DE HOMOGENEIZACIÓN

Los objetivos del tanque de homogeneización son:

- > Asegurar una mezcla de agua con características uniformes
- > Controlar el PH y asegurar un tiempo de retención hidráulica suficiente para la dosificación y mezcla completa de compuestos químicos reguladores del PH.

Por tanto, la geometría del tanque de homogeneización debe permitir su funcionamiento como un reactor de mezcla completa, por lo que se deben evitar diseños alargados y se deben disponer sistemas de mezclado y aireación adecuados con el fin de evitar la decantación de sólidos en la solera y la producción de olores. Con concentraciones normales de sólidos, la agitación necesaria está entre 4 – 8 w/m³ de tanque y la demanda de aire entre 0,8 – 2 m³/m³/h de tanque [2, pp. 63, tema 6].

En el diseño de los tanques de homogeneización se deben incluir los siguientes elementos auxiliares:

- > Instalaciones para la limpieza de paramentos con agua a presión
- > Sistemas de eliminación de materias flotantes
- > Aliviadero de emergencia para cubrir un eventual fallo del sistema
- > Rociadores de agua para evitar la acumulación de espumas en superficie
- > Dispositivos de medición de PH
- > Equipos para dosificación de compuestos químicos reguladores del PH

Tabla 7. Equipos en el homogeneizador

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Aireador sumergible	10	10000
Bomba dosificadora de sosa	0,5	5000
Equipo medición PH	0,1	3000

5.1.3 TRATAMIENTO PRIMARIO

El objetivo del tratamiento primario es:

- > Reducir la concentración sólidos en suspensión en el efluente

Para ello, se diseñan los decantadores de forma que la **velocidad ascensional** del agua en ellos sea igual o menor que la velocidad de sedimentación de la partícula objetivo.

Como este proceso es eminentemente físico (decantación por gravedad), sin adición de coagulantes o floculantes, los sólidos sobre los que se actuará serán los sedimentables.



La concentración de sólidos en el fango primario oscila entre el 1-2 % en peso, con una densidad de las partículas individuales de sólido seco en torno a 1400 kg/m^3 [3, p. 11]. En este proyecto se va a considerar un valor intermedio de concentración de fango primario; 15 kg/m^3 .

Para separar los sólidos sedimentables del agua se planea la instalación de dos decantadores rectangulares, provistos de un paquete de lamelas para acelerar el proceso de sedimentación.

Para que una partícula discreta decante en un decantador, su velocidad de caída debe ser mayor que la velocidad ascensional del líquido en el decantador.

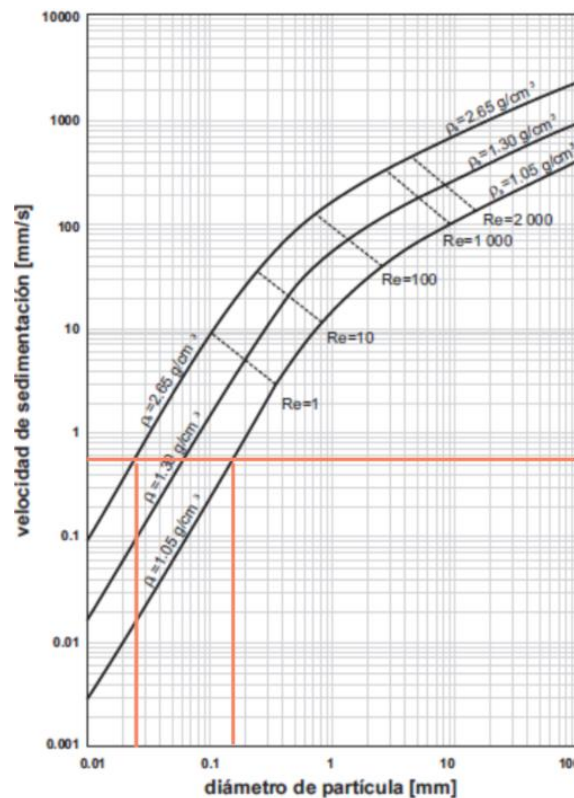


Figura 9. Velocidad de sedimentación de partículas discretas en función de la densidad y el diámetro, adaptado de [1, p. 348]

A efectos de diseño, **se consideran sedimentables aquellas partículas con una velocidad de sedimentación igual o superior a 2 metros/hora**, o $0,55 \text{ mm/s}$, la cual corresponde a partículas con diámetros entre $0,025$ y $0,15 \text{ mm}$, dependiendo de su densidad, véase la Figura 9. **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Si se instala un paquete de lamelas al final de los decantadores se puede considerar una velocidad ascensional mayor, lo que se traduce en un menor volumen requerido para el decantador.

Las lamelas inclinadas consiguen un doble efecto:



- a) Mantener el flujo en régimen laminar para velocidades que supondrían un régimen turbulento en caso de que el fluido no estuviese “entubado”.

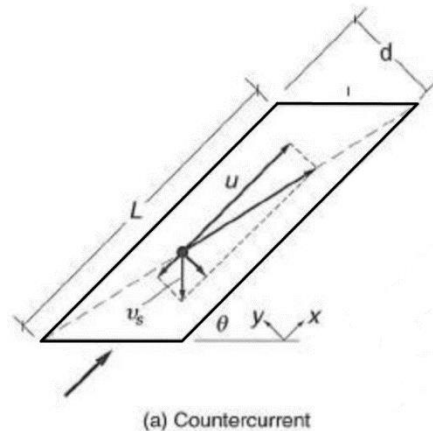


Figura 10. Trayectoria de una partícula con velocidad de sedimentación crítica en la posición de inicio más desfavorable, tomada de [1, p. 358]

- b) Dado que el flujo es laminar, el perfil de velocidad del fluido dentro del tubo es parabólico, por lo que se crea una zona con velocidad ascensional 0 en las paredes del tubo. La velocidad de sedimentación en este punto se aproxima a la teórica.

Así pues, la velocidad crítica de sedimentación será igual a aquella que, para una velocidad de paso por los tubos dada, cree una trayectoria de partícula de $[x=0, y=d]$, hasta $[x=L, y=0]$. La ecuación que describe dicha velocidad fue deducida por K. M. Yao en 1969 y publicada en [4]:

$$w = \frac{S \cdot v_0}{\sin \theta + L \cos \theta} \quad \text{Ec. 1}$$

Siendo,

w : velocidad crítica de sedimentación (velocidad mínima de sedimentación de una partícula para que quede capturada en la lamela).

S : coeficiente de sedimentación crítico, cuyo valor teórico para placas planas paralelas vale 1, adoptando un valor de $4/3$ para tubos circulares y $11/8$ para tubos cuadrados.

v_0 : velocidad de paso del fluido por el módulo de lamelas.

θ : ángulo de las lamelas respecto de la horizontal.

La Ec. 1 nos indica, para una determinada velocidad media de flujo en el tubo y unas dimensiones dadas, cuál es la velocidad crítica de sedimentación. Tal y como se desprende de la ecuación, cuanto mayor sea la longitud de los tubos, para una velocidad de flujo dada, menor será el tamaño de las partículas que decantarán (menor velocidad crítica).



Se disponen cuatro líneas de decantación primaria, siendo las dimensiones de cada decantador 25x5 metros y una profundidad de 3 metros, con lamelas en 10 metros de longitud. Véanse los cálculos detallados en la [Tabla 32](#).

El barrido del fango en el fondo y de las espumas en superficie se realizará mediante un sistema mecánico no metálico como el mostrado en la Figura 11. Los sólidos recogidos se bombean por la línea de fangos al espesador y posteriormente al digestor anaerobio.



Figura 11. Sistema de barrido del fango en el fondo y de la espuma en superficie, tomado del fabricante [Brentwood](#)



Figura 12. Canales de recogida del efluente clarificado

Tabla 8. Equipos decantación primaria

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Barredor automático de fango	5	15000
Bomba de fango	10	10000



5.1.4 TRATAMIENTO SECUNDARIO

El objetivo del tratamiento secundario es oxidar la materia orgánica biodegradable (COHNS) presente en el agua residual, y flocularla para que pueda ser separada por decantación en los decantadores secundarios. La oxidación o descomposición de la materia orgánica se llevará a cabo por medio de microorganismos presentes en el agua residual.

El tratamiento secundario consistirá en la aplicación de un proceso de fango activado siguiendo el esquema A²/O (Anaerobio, Anóxico, Aerobio), que permitirá la eliminación por vía biológica de nitrógeno y fósforo. Dicho proceso se desarrollará en un reactor tipo “flujo en pistón” con recirculación de fango desde los decantadores secundarios.

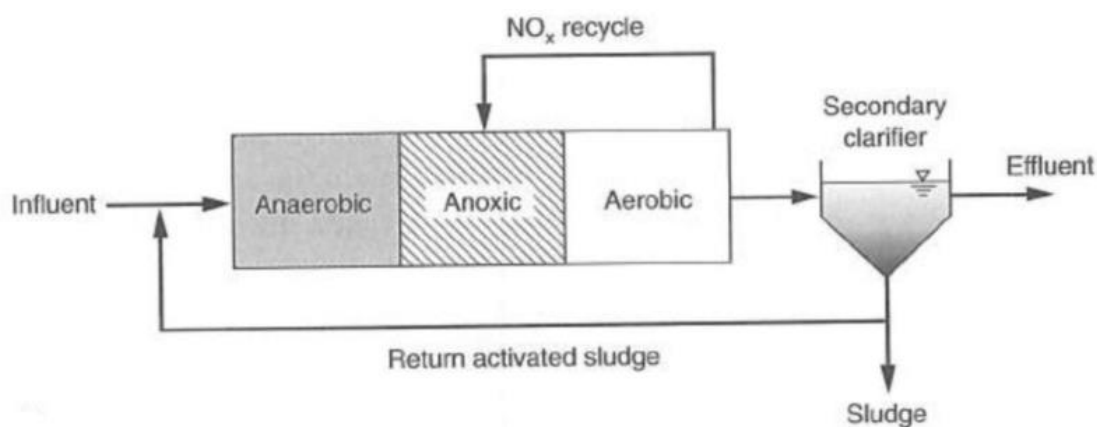


Figura 13. Esquema de proceso A²O

El proceso A²/O tiene una zona anóxica ubicada entre las zonas anaeróbica y aeróbica y se utiliza en sistemas EBPR (*Enhanced Biological Phosphorus Removal*) que tienen nitrificación. El nitrato se recicla de la zona aeróbica a la zona anóxica para desnitrificación. El tiempo de detención en la zona anóxica es de 1 a 3 h, dependiendo de las características del agua residual y la cantidad de nitrato a eliminar. El uso de la zona anóxica minimiza la cantidad de nitrato alimentado a la zona anaeróbica en el retorno de fangos activados.

5.1.4.1 DESCRIPCIÓN BÁSICA DEL PROCESO BIOQUÍMICO

A continuación, se describe la clasificación de los microorganismos según la fuente de la que obtienen el carbono y la energía para la síntesis celular:

5.1.4.1.1 TIPOS DE MICROORGANISMOS

> Por la fuente de **carbono**

- **Heterótrofos:** obtienen el carbono para la formación de nuevas células a partir de materia orgánica.



- **Autótrofos:** obtienen el carbono para la formación de nuevas células a partir de dióxido de carbono.
- > Por la fuente de **energía**
 - **Fotótrofos:** Obtienen la energía de los fotones.
 - **Quimiótrofos:** Obtienen energía de reacciones químicas.

5.1.4.1.2 OXIDACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Las reacciones químicas llevadas a cabo por los quimiótrofos, y por las que obtienen energía, son las de oxidación-reducción, en las que existe una transferencia de electrones entre el donante y el aceptor. El donante de electrones se oxida (materia orgánica) y el aceptor de electrones se reduce (oxígeno). El aceptor de electrones puede proceder del interior de la célula (metabolismo endógeno) o proceder del exterior, en forma de oxígeno disuelto (metabolismo exógeno). El uso de un aceptor de electrones interno se denomina metabolismo fermentativo y es menos eficiente que la respiración en el proceso de generación de energía [1, p. 573].

Cuando se utiliza oxígeno como aceptor de electrones la reacción se denomina **aerobia**, mientras que las reacciones que cuentan con otro aceptor de electrones se denominan **anaerobias**. El término **anóxico** se utiliza para distinguir el uso de nitrito o nitrato como aceptor de electrones, del de otros aceptores en condiciones anaerobias. Bajo condiciones anóxicas el nitrito o el nitrato se reducen a nitrógeno gaseoso. Los organismos que solo pueden satisfacer sus necesidades de energía a partir del oxígeno se denominan **aerobios obligados**, mientras que los que pueden utilizar nitrito o nitrato como aceptor de electrones en caso de que no haya oxígeno disponible, se denominan **aerobios facultativos**.

La oxidación de la materia orgánica la llevan a cabo los microorganismos heterótrofos aerobios presentes en el agua residual.



Type of bacteria	Common reaction name	Carbon source	Electron Donor (substrate oxidized)	Electron acceptor	Products
Aerobic heterotrophic	Aerobic oxidation	Organic compound	Organic compound	O ₂	CO ₂ , H ₂ O
Aerobic autotrophic	Nitrification	CO ₂	NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻	O ₂	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻
	Iron oxidation	CO ₂	Fe (II)	O ₂	Ferric Iron Fe (III)
	Sulfur oxidation	CO ₂	H ₂ S, S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	O ₂	SO ₄ ²⁻
Facultative heterotrophic	Denitrification anoxic reaction	Organic compound	Organic compounds	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	N ₂ , CO ₂ , H ₂ O
Anaerobic heterotrophic	Acid fermentation	Organic compound	Organic compounds	Organic compounds	Volatile fatty acids (VFAs) (acetate, propionate, butyrate)
	Iron reduction	Organic compound	Organic compounds	Fe (III)	Fe (II), CO ₂ , H ₂ O
	Sulfate reduction	Organic compound	Organic compounds	SO ₄	H ₂ S, CO ₂ , H ₂ O
	Methanogenesis	Organic compound	Volatile fatty acids (VFAs)	CO ₂	Methane
Anaerobic autotrophic	Anammox	CO ₂	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	N ₂ , NO ₃ ⁻

Figura 14. Clasificación de microorganismos, tomada de [1, p. 572].

Los microorganismos incorporan elementos nutritivos (Materia Orgánica disuelta y parte coloidal) a su protoplasma celular a la vez que utilizan parte de dichos elementos para producir energía y toman también oxígeno y nutrientes. Este proceso hace que se generen nuevas células y contribuye también a su crecimiento.

En los tratamientos biológicos el crecimiento celular ocurre simultáneamente con la oxidación de la materia orgánica. La relación entre la cantidad de biomasa generada y la cantidad de sustrato consumido se define como la tasa de síntesis de biomasa. Por ejemplo, en las reacciones heterótrofas aerobias la tasa se expresa como g biomasa/g de sustrato orgánico; para la nitrificación la tasa se expresa como g/ biomasa/g NH₄-N oxidado; y para la degradación anaerobia de los ácidos grasos volátiles para producir metano, la tasa se expresa como g biomasa/g AGV usado. Cuando se conocen los compuestos específicos que intervienen como sustrato, como el amonio, la tasa se cuantifica relativa a la cantidad de compuesto usado. En las aguas residuales, como existe una gran cantidad de compuestos orgánicos, la tasa se basa en un parámetro medible que refleje la cantidad total de materia orgánica, como la DQO o la DBO. Así pues, la tasa se expresa en g biomasa/ g DQO o g/DBO eliminada; es decir, medimos indirectamente la cantidad de materia orgánica putrescible por la cantidad de oxígeno empleada por un grupo de microorganismos para digerir una determinada cantidad de materia orgánica.

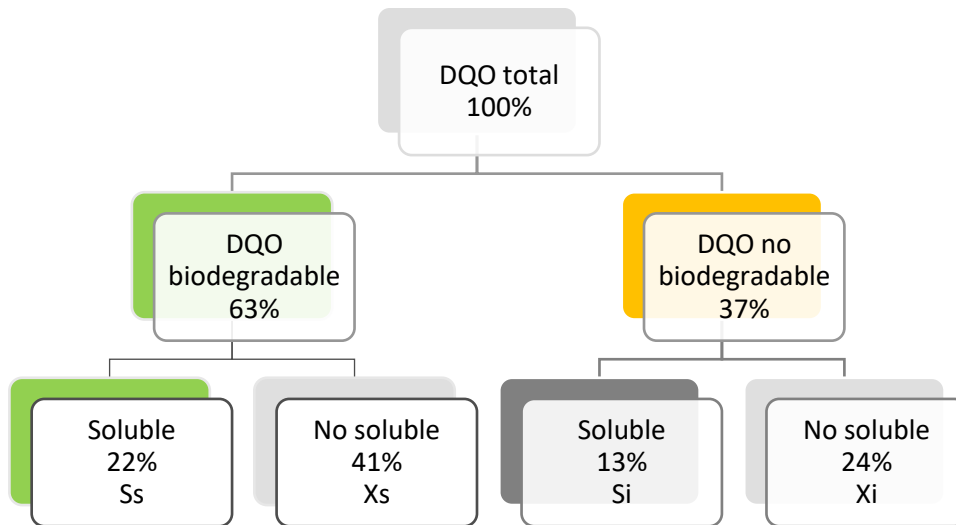


Figura 15. Cantidades orientativas de la materia orgánica DQO fraccionada

La relación entre la DQO biodegradable y la DBO_5 oscila entre 1,6 y 1,7 [1, p. 711].

Dentro del reactor biológico, la DQO se puede discretizar aún más considerando la materia orgánica viva, es decir, los microorganismos.

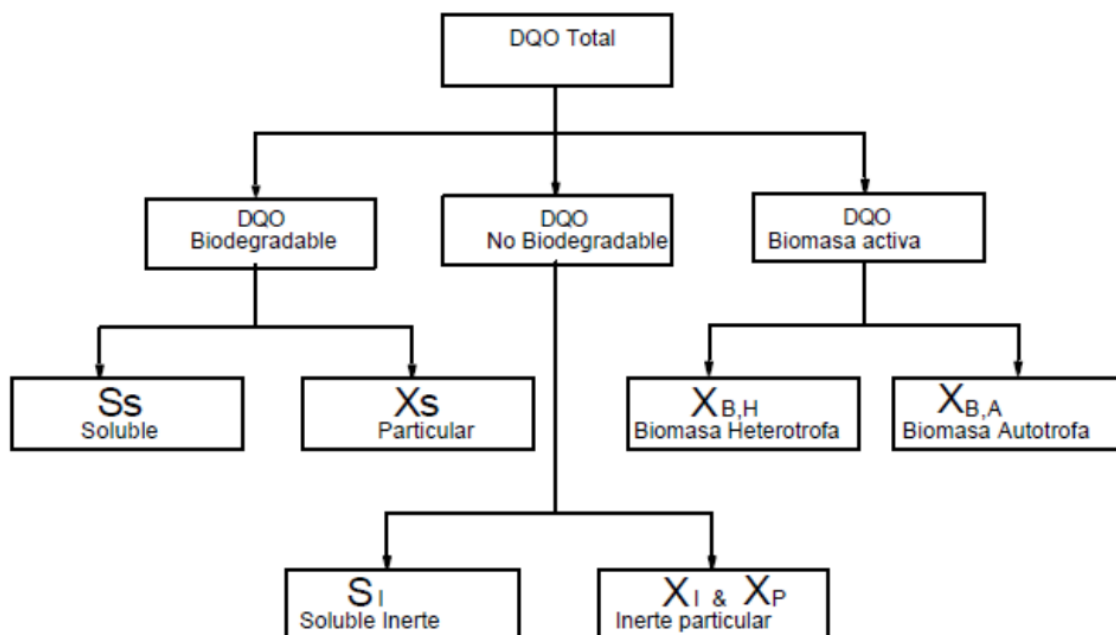


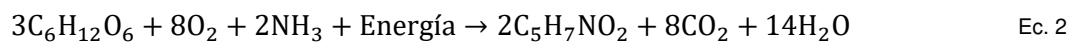
Figura 16. DQO fraccionada en el reactor biológico



En el reactor biológico aerobio se da un proceso de **transformación**, que no de eliminación (salvo por la respiración endógena, de la materia orgánica; es decir, la DQO soluble se transforma en biomasa heterótrofa (síntesis celular) y la DQO particulada e inerte se aglutinan junto con la biomasa en lo que denominamos **fango activo**. La **eliminación real** (transformación en gas) de la materia orgánica se producirá más adelante, en el digestor anaerobio (véase 5.2.2).

> Reacciones de síntesis celular

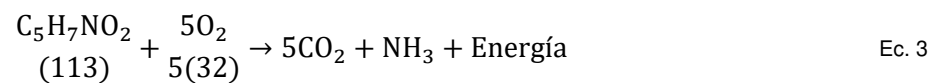
Si representamos la materia orgánica con la fórmula de la glucosa $C_6H_{12}O_6$, tenemos [1, p. 576]:



Como se puede observar en la Ec. 2, el sustrato, glucosa en este caso, se divide entre el que pasa a formar parte del tejido celular como $C_5H_7NO_2$ y el oxidado para producir dióxido de carbono y agua.

> Reacciones de oxidación de biomasa

La cantidad de oxígeno necesario para oxidar el tejido celular representado por $C_5H_7NO_2$ se puede obtener a partir de la Ec. 3 [1, p. 577]:



La DQO del tejido celular es

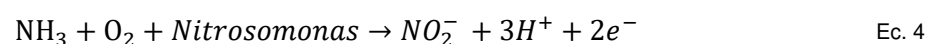
$$\frac{\Delta O_2}{\Delta C_5H_7NO_2} = \frac{5 \cdot 32 \text{ g/mol}}{113 \text{ g/mol}} = 1,42 \text{ g } O_2/\text{g células}$$

5.1.4.1.3 ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO POR VÍA BIOLÓGICA

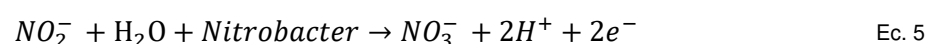
El nitrógeno se incorpora principalmente en forma de amoníaco al agua residual, a través de las proteínas y la urea. El proceso de eliminación biológica del nitrógeno consta de dos etapas o subprocesos:

- > **Nitrificación:** oxidación biológica del amoníaco con oxígeno para dar nitrito NO_2^- , seguida por la oxidación de esos nitritos a nitratos NO_3^- , es decir, consta asimismo de dos subprocesos que se desarrollan uno tras otro:

- Nitritación, según Ec. 4:



- Nitratación, según Ec. 5:

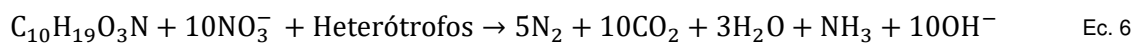




La oxidación del amoníaco a nitrito y la subsecuente oxidación a nitrato la hacen dos especies de bacterias nitrificantes. La primera etapa la hacen bacterias de los géneros microbiológicos *Nitrosomonas* y *Nitrosococcus* (entre otros). La segunda etapa (oxidación de nitrito a nitrato) la hacen bacterias del género *Nitrobacter*.

- > **Desnitrificación:** el nitrato producido en la zona aerobia se recicla a la zona anóxica, donde las bacterias desnitrificantes lo reducen a nitrógeno gaseoso oxidando la materia orgánica. El aceptor de electrones (elemento reducido) es el nitrato y el donante de electrones (elemento oxidado) es el sustrato, ya sea orgánico (organismos heterótrofos), o inorgánico (organismos autótrofos).

Si cuantificamos la materia orgánica biodegradable presente en el agua residual con el término $C_{10}H_{19}O_3N$ (U.S. EPA, 1993), podemos escribir la reacción de desnitrificación del siguiente modo [1, p. 634]:



El segundo es que sea transformado nuevamente en gas nitrógeno que regresa a la atmósfera: las bacterias llamadas desnitrificantes pueden reducirlo a nitrito y luego metabolizarlo a gas nitrógeno, aunque para ello requieren condiciones anaerobias.

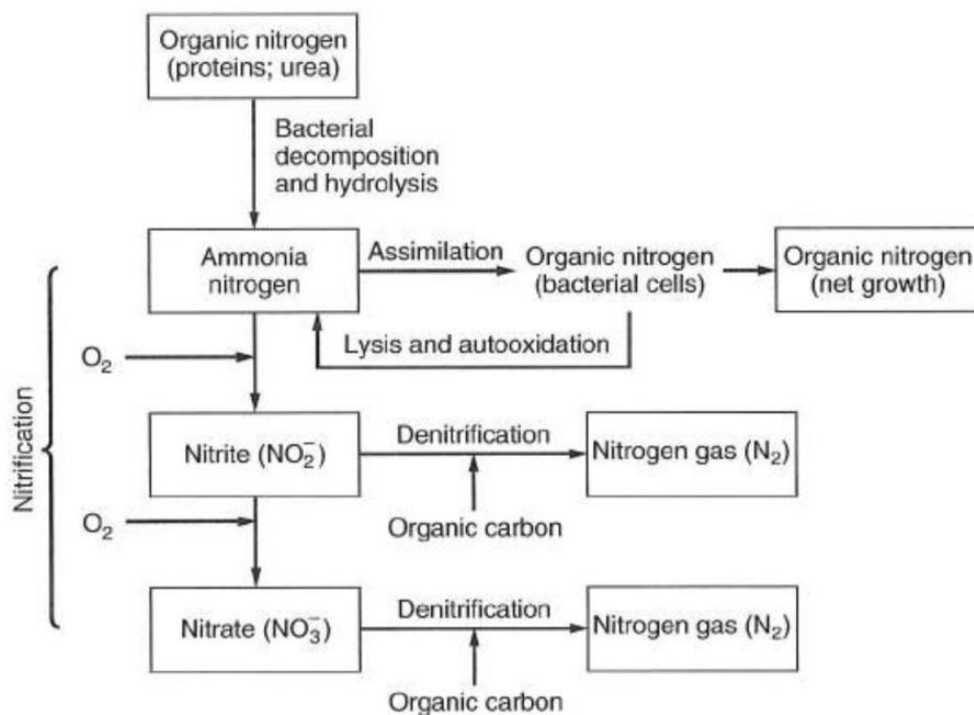


Figura 17. Transformación del nitrógeno en procesos de tratamiento biológico, tomada de [1, p. 632].



5.1.4.1.4 ELIMINACIÓN DE FÓSFORO POR VÍA BIOLÓGICA

En la zona anaerobia se lleva a cabo la eliminación del fósforo por medio de organismos acumuladores de fósforo. De la misma forma que los organismos heterótrofos consumen oxígeno, los organismos acumuladores de fósforo utilizan este compuesto para reducir la materia orgánica (sustrato) en condiciones anaerobias. Las condiciones anaerobias “desactivan” a los organismos heterótrofos, dejando a los organismos acumuladores de fósforo vía libre para consumir la materia orgánica utilizando la energía que les provee el fósforo.

Influent substrate parameter	Value	Reference
VFA:P	8	Wentzel (1990)
rbCOD:P	18	Barnard (2006)
BOD:P	30	Sedlak (1991)
COD:P	60	U.S. EPA (2010)

Figura 18. Tasas mínimas entre diferentes parámetros y el fósforo para conseguir la eliminación del fósforo por vía biológica, tomada de [1, p. 873].

Se han identificado organismos acumuladores de fósforo en las bacterias de la familia *Rhodocyclales*, véase sección 7-13 de [1].

5.1.4.2 BASES DE DISEÑO DEL REACTOR BIOLÓGICO

Como para cualquier otro proceso bioquímico, el dimensionado de las instalaciones puede realizarse utilizando criterios con base cinética o con base empírica.

5.1.4.2.1 MODELOS CINÉTICOS

Aunque el reactor utilizado en el proceso A²O es de tipo flujo en pistón, para modelizar el reactor y escribir el balance de masas se considerará como un reactor de mezcla completa, por los siguientes motivos:

- El flujo en pistón es un flujo teórico imposible de conseguir en la práctica en condiciones de campo ya que las turbulencias, gradientes de velocidad, recirculaciones internas, viento, diferencia de temperatura etc. harán que se produzca mezcla de masas de agua en el sentido longitudinal del reactor.
- El modelo matemático del balance de masas del reactor de mezcla completa es mucho más simple que el del reactor de flujo en pistón y queda del lado de la seguridad cuando se utiliza en un reactor de flujo en pistón. Véase [1, p. 608].

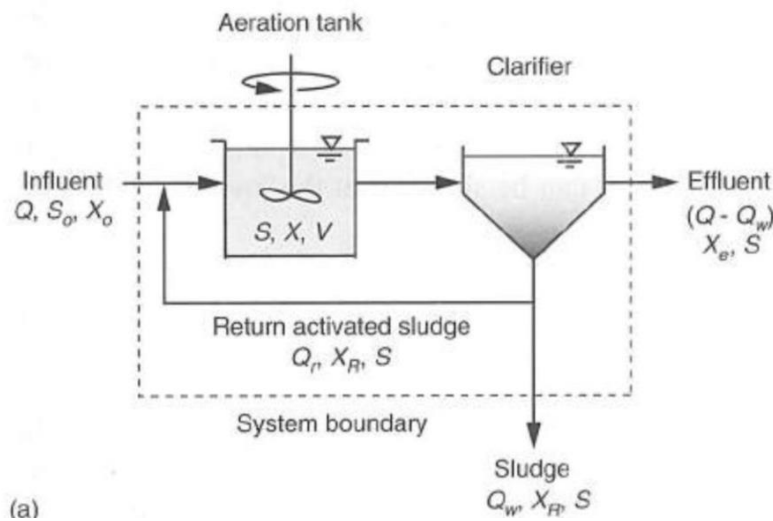


Figura 19. Planteamiento esquemático del balance de masas del reactor, tomado de [1, p. 597].

Antes de realizar el balance de masas del reactor es importante determinar el tiempo de retención de sólidos en este. El tiempo de retención vendrá dado por la relación entre la masa de sólidos en el reactor y la tasa de evacuación de dichos sólidos. Se expresa matemáticamente en la Ec. 7.

$$\theta = \frac{VX}{(Q - Q_w)X_e + Q_wX_R} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde,

θ : Tiempo de retención de sólidos

V : Volumen

X : Concentración de biomasa en el reactor

X_e : Concentración de biomasa en el efluente

X_R : Concentración de biomasa en la descarga

Q : Caudal de entrada

Q_w : Caudal de descarga a línea de fangos

En condiciones estables las concentraciones son constantes, por lo que el tiempo de retención de sólidos dependerá del caudal de descarga a la línea de fango.

El balance de masa de los microorganismos, o biomasa, en el reactor, se puede expresar el siguiente modo:

$$\text{Tasa de acumulación de biomasa en reactor} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Crecimiento neto}$$



$$\frac{dX}{dt}V = QX_0 - (Q - Q_w)X_e - Q_wX_R + r_xV \quad \text{Ec. 8}$$

Donde,

r_x : Tasa de crecimiento neto de microorganismos, [g SSv/(m³·día)] → (Nacimientos – Muertes)

$$r_x = Yr_{su} - bX \quad \text{Ec. 9}$$

Donde

Y : Tasa de síntesis de microorganismos [g SSv / g sustrato]

b : Tasa de muerte [g SSv / g SSv·día]

r_{su} : Tasa de utilización de sustrato por unidad de volumen de reactor [g/(m³·día)]. En este proyecto se utiliza el modelo propuesto por Monod en [5] y [6], y reflejado en la Ec. 10.

$$r_{su} = \frac{kXS}{K_S + S} = \frac{Q(S_0 - S)}{V} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde,

k : Tasa específica máxima de utilización de sustrato [g sustrato/g microorganismo·día]

S_0 : Concentración del sustrato limitante del crecimiento en afluente

S : Concentración del sustrato limitante del crecimiento en efluente

K_S : Concentración de sustrato a la mitad de la tasa específica máxima de utilización de sustrato

Monod en [5] y [6] propuso una ecuación de la forma de la Ec. 10 para describir la tasa específica de crecimiento bacteriano cuando los microorganismos disponen del sustrato limitante.

$$r_g = \frac{\mu_m XS}{K_S + S} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde,

μ_m : Tasa específica máxima de crecimiento bacteriano [g microorganismo / g microorganismo·día]

Es decir, se cambia la tasa de utilización de sustrato por la de crecimiento bacteriano.

A medida que las bacterias consumen el sustrato, la energía producida por la oxidación de este se usa para procesar carbono y nutrientes y generar nueva biomasa. El crecimiento es directamente proporcional al sustrato utilizado y se describe por la tasa de síntesis Y .

Si consideramos condiciones estacionarias con $\frac{dX}{dt} = 0$ y que la concentración de microorganismos en el influente es despreciable, nos queda, combinando la Ec. 7, Ec. 8, Ec. 9, Ec. 10 y reagrupando:



$$X = \frac{\theta Y(S_0 - S)}{\tau(1 + b\theta)}$$

Ec. 12

Donde,

τ : Tiempo de retención hidráulico, V/Q

La ecuación que cuantifica la concentración de sustrato en el efluente del reactor puede derivarse a partir del siguiente balance de masas:

Acumulación de sustrato en reactor = Entrada – Salida + Generación – Utilización

$$\frac{dS}{dt}V = QS_0 - QS + r_{su}V$$

Ec. 13

Asumiendo que no existe variación en la concentración de sustrato en el reactor, es decir, asumiendo condiciones estacionarias ($\frac{dS}{dt} = 0$), la Ec. 13 se puede escribir como:

$$S_0 - S = \frac{V}{Q} \frac{kXS}{K_S + S}$$

Ec. 14

$$S_0 - S = \frac{V}{Q} \frac{kS}{K_S + S} \frac{\theta QY(S_0 - S)}{1 + b\theta}$$

Ec. 15

Reagrupando se tiene:

$$S = \frac{K_S(1 + b\theta_c)}{\theta_c(Yk - b) - 1}$$

Ec. 16

Coefficient	Unit	Value ^a	
		Range	Typical
k	g bsCOD/g VSS·d	4–12	6
K_s	mg/L BOD	20–60	30
	mg/L bsCOD	5–30	15
Y	mg VSS/mg BOD	0.4–0.8	0.6
	mg VSS/mg COD	0.4–0.6	0.45
b	g VSS/g VSS·d	0.06–0.15	0.10

Figura 20. Coeficientes cinéticos típicos para la eliminación de DBO en procesos de fango activado, tomados de [1, p. 593]



Coefficient	Unit	COD oxidation ^a	NH ₄ oxidation ^b	NO ₂ oxidation ^b
μ_{max}	g VSS/g VSS·d	6.0	0.90	1.0
$K_{s,} K_{NH_4}, K_{NO_2}$	mg/L	8.0	0.50	0.20
Y	g VSS/g substrate oxidized	0.45	0.15	0.05
b	g VSS/g VSS·d	0.12	0.17	0.17
f_d	unitless	0.15	0.15	0.15
K_{O_2}	mg/L	0.20	0.50	0.90
<hr/>				
θ Value				
μ_{max}	unitless	1.07	1.072	1.063
b	unitless	1.04	1.029	1.029
$K_{s,} K_{NH_4}, K_{NO_2}$	unitless	1.0	1.0	1.0

Figura 21. Coeficientes cinéticos de diseño para la eliminación de DQO y nitrificación a 20°C , tomados de [1, p. 755]

La limitación fundamental para la utilización practica de estos modelos procede del hecho de que **los datos bibliográficos procedentes de estudios de laboratorio rara vez describen el comportamiento de los reactores piloto o industriales, por lo que es necesario recurrir a datos experimentales**. Por este motivo, en este proyecto, se realiza el dimensionamiento mediante **métodos empíricos** y posteriormente se realiza el dimensionamiento utilizando **métodos cinéticos**, comparando los resultados obtenidos utilizando los datos de laboratorio de constantes bioquímicas con los obtenidos por métodos empíricos. Posteriormente se ajustan las constantes de los modelos cinéticos para hacer coincidir el diseño con el obtenido por métodos empíricos, y se compara la variación numérica de las constantes.



5.1.4.2.2 MODELOS EMPÍRICOS

Los modelos utilizados toman como base de cálculo las variables típicas del proceso:

- > **Carga másica:** masa de materia orgánica oxidada al día respecto de la masa de microorganismos existentes en el reactor biológico.

$$CM = \frac{Q(S_0 - S)}{VX}$$

Ec. 17

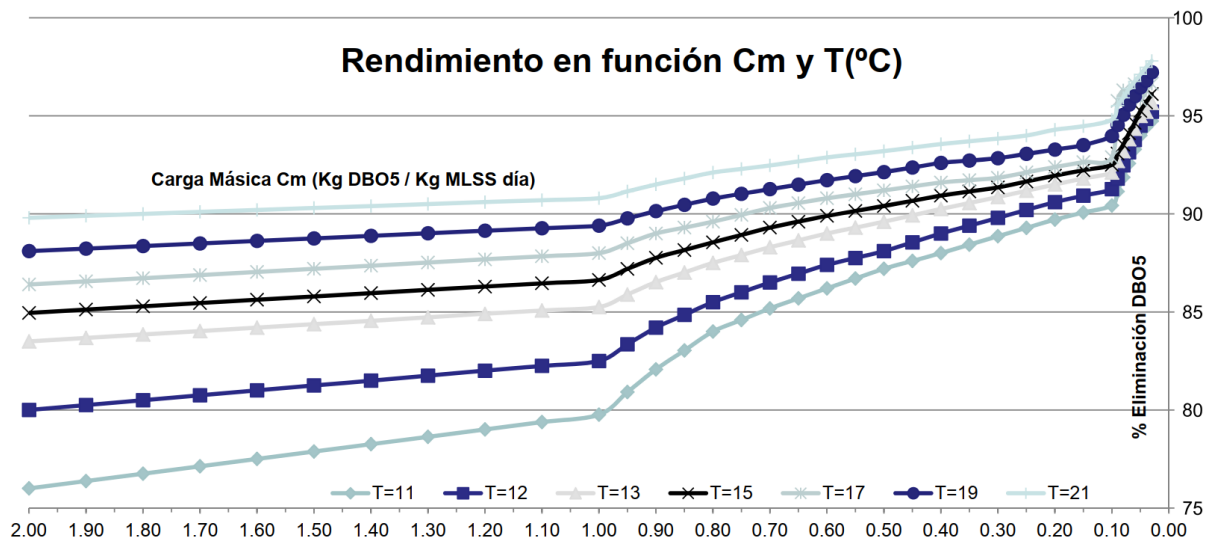


Figura 22. Rendimiento observado en la eliminación de la DBO en función de la carga másica y la temperatura, tomada de [2].

A partir de la Ec. 17, considerando una concentración de sólidos de 4 kg/m^3 , y la gráfica mostrada en la Figura 22, se puede determinar el volumen de reactor necesario para obtener una tasa determinada de eliminación de DBO.

- > **Producción de fangos:** Utilizando la fórmula de Huisken modificada

Para dimensionar el reactor biológico, y cada una de sus zonas, se utilizarán además los siguientes criterios:

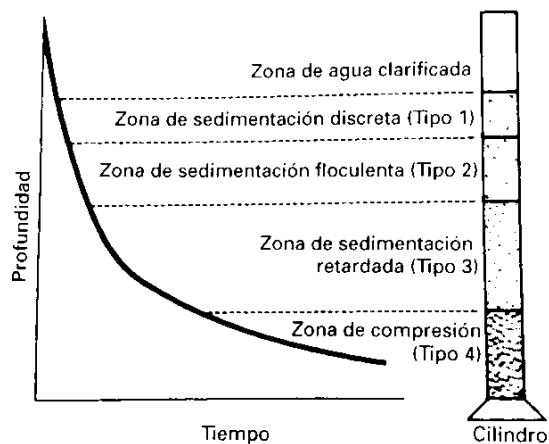
- > Zona anaerobia: Tiempo de retención hidráulica entre 0,5-1,5 horas.
- > Zona anóxica:
- > Zona aerobia:



5.1.4.3 DECANTADOR SECUNDARIO

El tratamiento secundario finaliza con un decantador, denominado decantador secundario. Los objetivos del decantador secundario son:

- > Obtener un efluente con bajo contenido de SS.
- > Sedimentar y recircular el porcentaje de fango necesario para mantener la concentración de sólidos en suspensión en reactor secundario.
- > Enviar los fangos en exceso al espesador.



Para obtener un efluente con bajo contenido en SS se separan por gravedad los sólidos contenidos en el licor mezcla de fango activado procedente del reactor. Un porcentaje del fango retenido en el fondo del decantador se recircula al reactor para mantener la concentración de sólidos en este. La sedimentación que se desarrolla en el decantador secundario, denominada retardada y de compresión, es distinta de la que ocurre en el decantador primario. Mientras que en el decantador primario las partículas no interactúan entre sí y su movimiento sigue la ley de Stokes, en el decantador secundario las partículas sí que interactúan entre sí, ralentizando la sedimentación. Las partículas forman un manto que sedimenta en conjunto como una masa. Debido a la alta concentración de partículas es el líquido el que tiende a ascender por los intersticios existentes entre aquellas y aparece una zona superior clarificada.

Las partículas forman un manto que sedimenta en conjunto como una masa. Debido a la alta concentración de partículas es el líquido el que tiende a ascender por los intersticios existentes entre aquellas y aparece una zona superior clarificada.

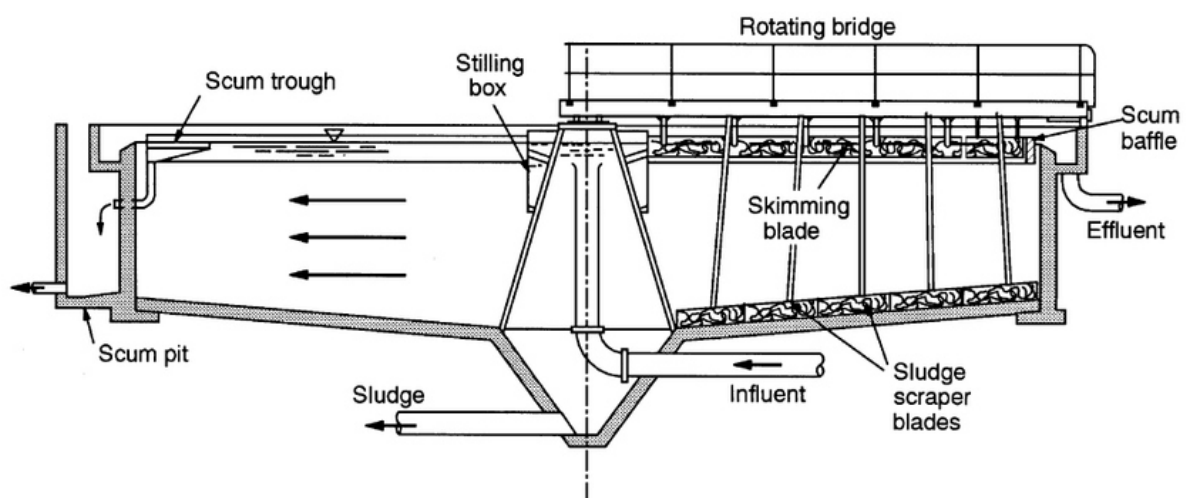


Figura 23. Sección tipo de decantador secundario, tomada de [ResearchGate](#).



La capacidad de sedimentación propia de las partículas puede cuantificarse mediante el Índice Volumétrico de Fangos o Índice de Mohlman, que se define como el volumen en ml ocupados por 1 gr de sólido del licor mezcla del fango activado en una probeta de 1000 ml después de 30 minutos. Valores bajos del IVF (<100), indican una buena calidad de sedimentación.

Según [1, p. 725], la concentración de SSt en el efluente del decantador secundario de instalaciones bien diseñadas de eliminación de nutrientes por vía biológica oscila entre 4 y 10 mg/L. Sin embargo, tal y como se comenta en [7], puede haber cuatro razones por las que la concentración de SS en el efluente del decantador secundario se sitúe por encima de los 10 mg/L: desnitrificación, manto de fango alto, problemas de floculación o hidráulicos. En [8, p. 6] se reportan valores en torno al 95% de tasa de eliminación de SS y 60-70% de eliminación de ST.

En vista de lo anterior, en este proyecto se va a considerar un rendimiento del 95% en la eliminación de sólidos suspendidos (SS) y un rendimiento del 60% en la eliminación de sólidos totales (ST). Por tanto, podemos considerar que a la salida del decantador secundario los sólidos remanentes en el agua residual se encuentran en forma coloidal y disuelta.

El diseño global del decantador secundario se realiza según [9].

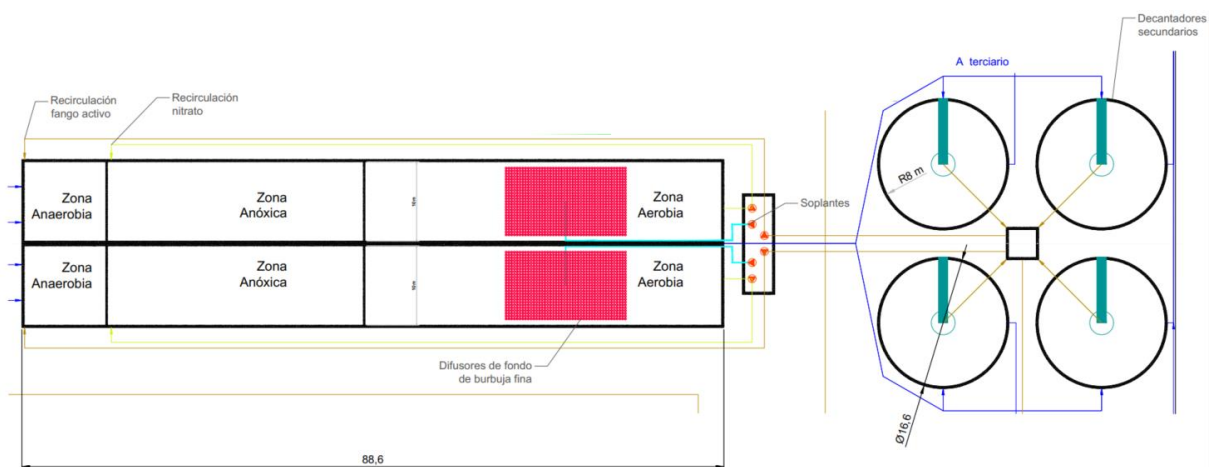


Figura 24. Esquema de tratamiento secundario

De la Ec. 7 se deduce el caudal enviado a la línea de fangos:

$$Q_w = \frac{VX}{\theta X_R} - \frac{Q_e X_e}{X_R} \quad \text{Ec. 18}$$

A partir del esquema planteado en la Figura 25 se deduce el balance de masas del decantador secundario, a partir del cual se obtendrá el caudal de recirculación Q_R . Considerando que la concentración de sólidos en el decantador es constante tenemos:

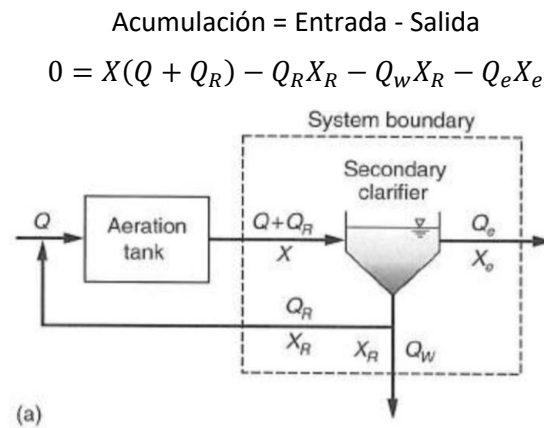


Figura 25. Planteamiento esquemático del balance de masas en el decantador, tomado de [1, p. 730]

Considerando que la concentración de sólidos a la salida del decantador X_e es despreciable y combinando las Ec. 18 y Ec. 19 Ec. 21, tenemos:

$$Q_R = \frac{\frac{VX}{\theta} - XQ}{X - X_R}$$

Ec. 20

5.1.5 TRATAMIENTO TERCIARIO

Los objetivos del tratamiento terciario son:

- > Reducir la turbidez
- > Reducir la concentración de gérmenes patógenos en el agua; es decir, desinfectarla

Para cumplir con estos objetivos se propone primero un tratamiento fisicoquímico para decantar los sólidos en suspensión que se encuentran ya, en su mayor parte, en forma coloidal, y después un proceso de desinfección con luz ultravioleta seguido de otro de cloración.



5.1.5.1 DECANTACIÓN DE MATERIA COLOIDAL

Tal y como se indica en 5.1.4.3, a la salida del decantador secundario, los sólidos en suspensión remanentes se encuentran en forma coloidal, con un tamaño que oscila entre 0,001 y 1 micra. Estas partículas son las responsables de la turbidez y el color del agua.

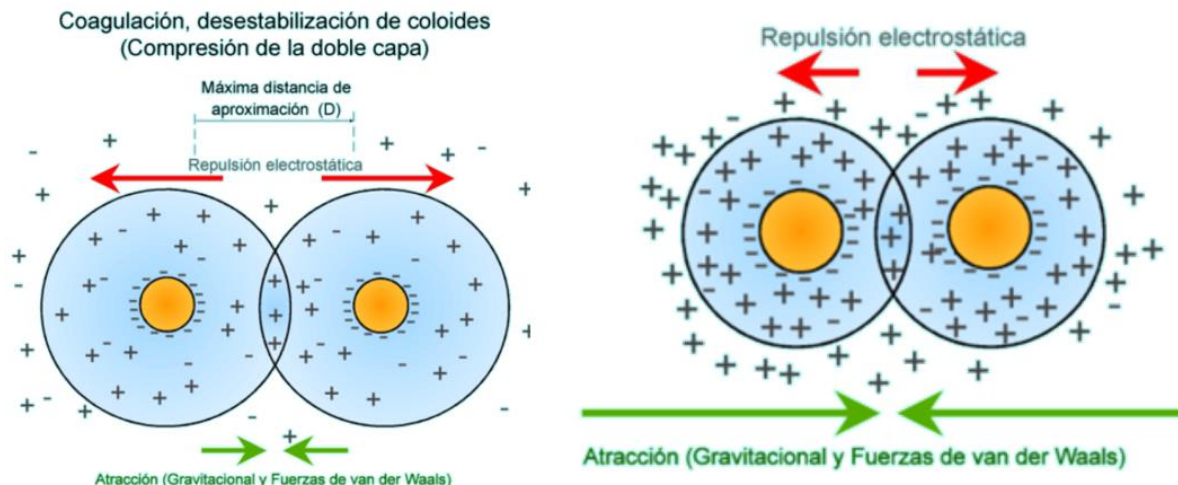


Figura 26. Proceso de compresión de la doble capa eléctrica, consecuencia de la adición de coagulante, tomada de [2]

Las partículas coloidales tienen carga eléctrica, que suele ser negativa en las encontradas en aguas residuales. Para compensar dicha carga primaria negativa de la partícula coloidal, aparece una doble capa; por un lado, la partícula con su carga y por otro los iones de carga opuesta (contraiones) que se agrupan en el agua cerca de la superficie de la referida partícula (ver figura). Los contraiones, atraídos electrostáticamente hacia esta interfase partícula agua, originan un gradiente de concentración motivando una mayor presencia de estos en las proximidades de la superficie de la partícula.

Al dosificar un coagulante este aporta una elevada concentración de contraiones a la masa de agua. Esta elevada concentración posibilita que el diámetro de la capa difusa disminuya al conseguirse la electroneutralidad en un menor volumen de agua, es decir, en un menor diámetro de la capa difusa. Al disminuir la doble capa difusa disminuye el potencial Z y la unión de dos coloides se facilita [2].

5.1.5.1.1 COAGULACIÓN

El término coagulación se refiere a la desestabilización de estos coloides producida por **compresión de la doble capa eléctrica** que rodean a toda partícula coloidal, lo que facilita su agregación con otros



coloides. Tras la dosificación de un coagulante, se produce la aparición de corpúsculos formados por partículas coloidales que se adhieren unas a otras al ser desestabilizado el coloide.

La coagulación se lleva a cabo en arquetas con sistema de mezclado rápido.

Tradicionalmente se han utilizado coagulantes inorgánicos como el cloruro férrico, el sulfato de aluminio o el policloruro de aluminio.

La adición de coagulante para la desestabilización de las partículas coloidales se realizará en una arqueta con un tamaño suficiente como para proveer un TRH de 45 segundos al caudal punta. Este valor representa la media entre lo indicado en la tabla 5-9 de [1] y lo indicado en el tema 7 de [2].

En esta arqueta se instalará un agitador de mezcla rápida tipo VRG 3061S de *Milton Roy* o similar

La potencia mínima necesaria de agitación para alcanzar régimen turbulento en el tanque se estima con la ecuación de Rushton, dada en [10].

$$P = K\rho N^3 d^5 \quad \text{Ec. 21}$$

Donde,

P: Potencia de agitación requerida [W]

K: Constante dependiente del tipo de agitador

ρ: Densidad del fluido [$\frac{kg}{m^3}$]

N: Velocidad del impulsor [r.p.s]

d: Diámetro del impulsor [m]

El valor de K en la ecuación de Rushton se toma de [2].

El agitador para el tanque de mezcla rápida será de flujo axial (tipo hélice de barco).



ESPECIFICACIONES

Tipos	Potencia Motor (kW)	Velocidad Rotación (rpm)	Longitud Máxima (mm) H	Diametro Hélice (mm) D	Caudal Hélice (m³/h)	Peso (Kg)	Fuerza Axial (DaN)	Par (DaNm)
0021S	0.37	184	1500	200	95	26	1	1.9
1041S	0.55	158	1500	400	650	4	15	3.3
2031S	0.75	293	1500	300	509	40	16	2.4
3061S	1.1	99	2000	600	1379	49	29	10.6
5082S	2.2	95	2100	800	3135	95	81	22
5101S	2.2	69.3	1900	1000	4450	124	103	30.3
7121S	4	63.7	2300	1200	7065	198	176	60
8141S	5.5	53.3	2700	1400	9391	324	226	98.5
9161S	7.5	47.7	2700	1600	12549	465	306	150.2
9182S	7.5	39.7	3800	1800	14868	556	338	180.4

La dosis óptima de coagulante se calcula según la ecuación empírica de Letterman, dada en [11].

$$GT_0C^{1,46} = 5,9 \cdot 10^6 \quad \text{Ec. 22}$$

Donde,

G: **gradiente de velocidad** , 1/s

T₀: Tiempo óptimo de mezcla, s

C: Dosis de coagulante alúmina, mg/l

5.1.5.1.2 FLOCULACIÓN

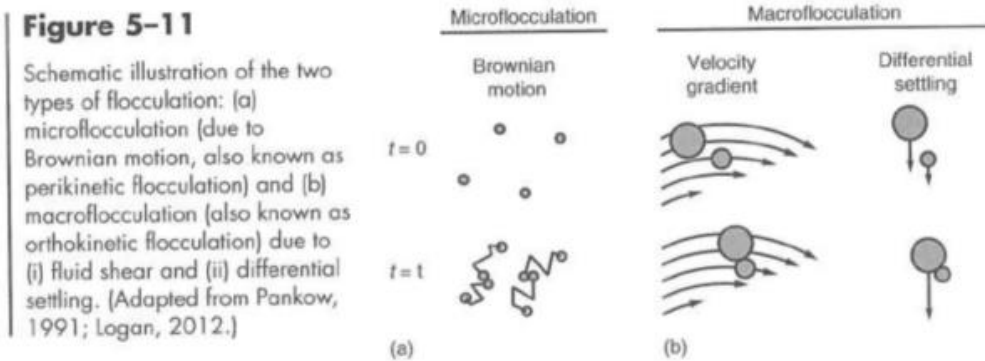
Tras la coagulación, se dosifica un floculante, un polímero, y se produce ahora un **engrosamiento de los corpúsculos iniciales** dando paso así a la creación de un flóculo compuesto por el aglutinamiento de estos y del floculante dosificado.

La floculación persigue la obtención de un flóculo de dimensiones elevadas, consistente, resistente y de precipitación rápida. Podemos decir que el proceso de floculación es complementario al de coagulación [2, pp. tema 7, pág 36].

Los coagulantes inorgánicos suelen estar compuestos de sales metálicas, normalmente de aluminio o hierro (los más usados son sulfato de aluminio, cloruro de hierro y sulfato de hierro).

Tabla 9. Reactivos utilizados en los procesos de coagulación-floculación

Reactivo	Dosis óptima [mg/L]	Precio aproximado [€/kg]
Sulfato de aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃	30	3,5
Polielectrolito aniónico	0,5	3,5



El **gradiente de velocidad** expresa la tasa de cambio del vector velocidad con respecto del espacio, por tanto, sus unidades son $\frac{\frac{m}{s}}{m} = \frac{1}{s}$

Camp y Stein (1943) estudiaron los gradientes de velocidad que se producían en tanques de floculación en régimen turbulento [12] [1]

Tabla 10. Equipos en el proceso de de coagulación-floculación-decantación

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Bomba dosificadora	0,4	5000
Agitador de mezcla rápida	1,1	5000
Agitador de mezcla lenta	1,5	5000
Barredor automático de fango	2	12000
Bomba de fango	5	8000

Una vez los sólidos en suspensión han floculado, se pasa la mezcla por un decantador de las mismas características que los instalados en el tratamiento primario, para eliminar por decantación los sólidos en suspensión floculentos.



Figura 27. Agitador de mezcla lenta en cámara de floculación, tomada de [TIMSA](#).

5.1.5.1.3 ALMACENAMIENTO DE REACTIVOS

Se proveerá una capacidad de almacenamiento equivalente a 15 días de consumo de reactivos. Los tanques de almacenamiento serán de poliéster o cualquier otro material resistente a la corrosión.



Figura 28. Depósitos de reactivos en cubeto de retención



5.1.5.2 FILTRACIÓN POR ARENA

Tras la decantación de los sólidos floculantes se contempla la instalación de un filtro de arena. El objetivo de este filtro es:

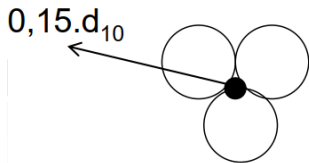
- > Retener los huevos de nemátodo (20-60 μm) y restos de sólidos en suspensión que hayan escapado del decantador,

Como consecuencia, se disminuirá la turbidez y aumentará la efectividad de la desinfección subsiguiente con luz ultravioleta.

El filtro de arena consiste en un lecho de arena de 1 metro de espesor sobre una capa de grava de 0,3 metros. Las características de la arena se resumen en la siguiente tabla, tomada de [2].

Tabla 11. Valores orientativos de las principales propiedades del filtro de arena

Propiedades	Unidades	Arena	Antracita
Talla efectiva, d_{10}	mm	0,4-0,8	0,8-2,0
Coef. Uniformidad, d_{60}/d_{10}	s.u.	1,3-1,7	1,3-1,7
Densidad	kg/cm^3	2,65	1,4-1,8
Porosidad	%	40-43	47-52
Dureza	Moh	7	2-3



Se puede tomar como referencia un valor de $0,15 \cdot d_{10}$ para determinar el tamaño mínimo de partícula que quedará retenida en el filtro.

Tabla 12. Tamaño de algunas partículas presentes en el agua residual a la llegada al filtro de arena

Tipo de sólido	Tamaño en micras (μm)
Suelo	1-100
Cryptosporidium	5
Bacterias	0,3-3
Virus	0,005-0,01
Partículas floculadas	10-2.000
Partículas visibles	37
Giardia	8-12
Huevos de nemátodo	40

Para retener huevos de nemátodo es necesario una talla efectiva de arena de entorno a:

$$\frac{0,040 \text{ mm}}{0,15} = 0,26 \text{ mm}$$



Dada la elevada pérdida de carga que se produce en el filtro de arena, se prevé la necesidad de instalar un grupo de bombeo previo. El cálculo de la pérdida de carga se realiza con la ecuación de Rouse, publicada en [13]. El valor de la pérdida de carga varía desde un valor inicial de 0,41 metros (véase el Anejo 5.7) considerando el filtro limpio, calculado según la mencionada ecuación, hasta un valor infinito cuando el filtro se encuentra colmatado. Cuando los sensores de nivel en el filtro detecten un valor de pérdida de carga igual o superior a 2 metros se activará la señal indicativa de necesidad de realizar la operación de lavado del filtro.

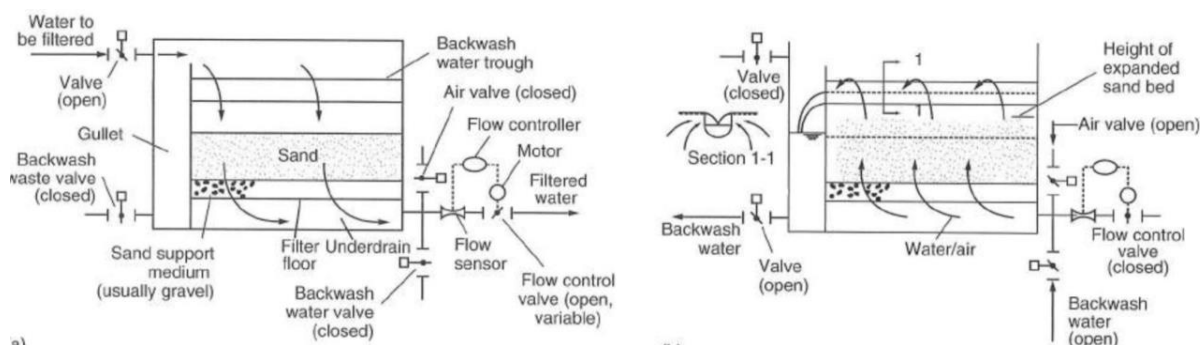


Figura 29. Proceso de filtrado (a) y lavado (b) en un filtro de arena. Tomada del capítulo 11-4 de [1].

Para determinar el tamaño necesario del filtro de arena se utiliza el siguiente criterio:

$$\text{Caudal de entrada máximo} = \text{Caudal mínimo filtrado}$$

Para ello se toman de referencia los valores dados en la tabla 11-15 de [1, p. 1163], donde la tasa de filtración oscila entre 4,8 y 14,4 metros/hora. Redondeando se toma una velocidad ascensional para el filtro de 120 m/día.

$$V_{\text{ascensional filtro arena}} = 120 \text{ m/día}$$

Tabla 13. Equipos en el proceso de filtración por arena

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Bombas de elevación	15	20000
Bombas de lavado	10	10000



5.1.5.3 DESINFECCIÓN

La desinfección se va a llevar a cabo por medio de dos sistemas conectados en serie. Cada uno de estos sistemas se va a dimensionar para ser capaz, por sí mismo, de cumplir con los límites de concentración de gérmenes patógenos establecidos.

El primer sistema de desinfección será un canal de radiación UV; el segundo sistema consistirá en un laberinto de cloración. El laberinto de cloración constituye un recurso de seguridad en caso de emergencia o fallo del sistema UV.

5.1.5.3.1 DESINFECCIÓN MEDIANTE RADIACIÓN DE LUZ ULTRAVIOLETA

La radiación mediante luz ultravioleta (UV) es capaz de inactivar bacterias, virus, esporas y quistes de protozoos debido a que esta penetra en el material genético, ADN o ARN, del microorganismo y destruye o retarda su capacidad reproductiva. La máxima eficiencia en el proceso germicida se alcanza con la radiación UV de longitud de onda corta (UV-C), a 254 nm [14].

La ley de Watson-Chick, derivada de los trabajos de [15] y [16], permite conocer el resultado de la desinfección, valorado como el número final de microorganismos después de la dosificación de una determinada dosis de radiación UV. Esta ley se recoge en la Ec. 23 y Ec. 24.

$$\frac{N}{N_0} = e^{-kD} \quad \text{Ec. 23}$$

$$D = I \cdot t \quad \text{Ec. 24}$$

Donde,

N : nº de microorganismos a tiempo t

N_0 = nº de microorganismos inicial

k : constante de inactivación dependiente del microorganismo

I : intensidad de radiación, $\frac{W}{m^2}$ [ML^2T^{-3}]

t : tiempo, s [T]

La intensidad de radiación recibida por los microorganismos se puede obtener mediante la ley de Bouguer-Lambert-Beer [17] [18] [19].

$$\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) = -\varepsilon(\lambda)Cx = -k(\lambda)x = \frac{-A(\lambda)}{x}$$

Donde,

I : Intensidad de radiación a una distancia x , $\frac{W}{m^2}$



I_0 : Intensidad de la luz en la fuente, $\frac{W}{m^2}$

ε : absorptividad molar del soluto a una longitud de onda λ , $\frac{m^2}{mol}$

C : Concentración de soluto, $\frac{mol}{m^3}$

x : distancia, m

$k(\lambda)$: absorptividad, $\frac{1}{m}$

$A(\lambda)$: absorbancia, $[-]$

Aunque la absorbancia no tiene dimensiones a menudo se expresa en $[L^{-1}]$, que corresponde con la absorptividad. Si la distancia recorrida por la luz es 1 cm, la absorptividad es igual a la absorbancia [1, p. 1394]. La absorbancia mide la cantidad de energía que es absorbida por el fluido, mientras que la transmitancia es la magnitud inversa, es decir, la cantidad de energía que se transmite por el fluido. A mayor absorbancia, menor transmitancia. La transmitancia se expresa como la relación entre la intensidad inicial y la final.

$$T = \frac{I}{I_0}$$

Ec. 25

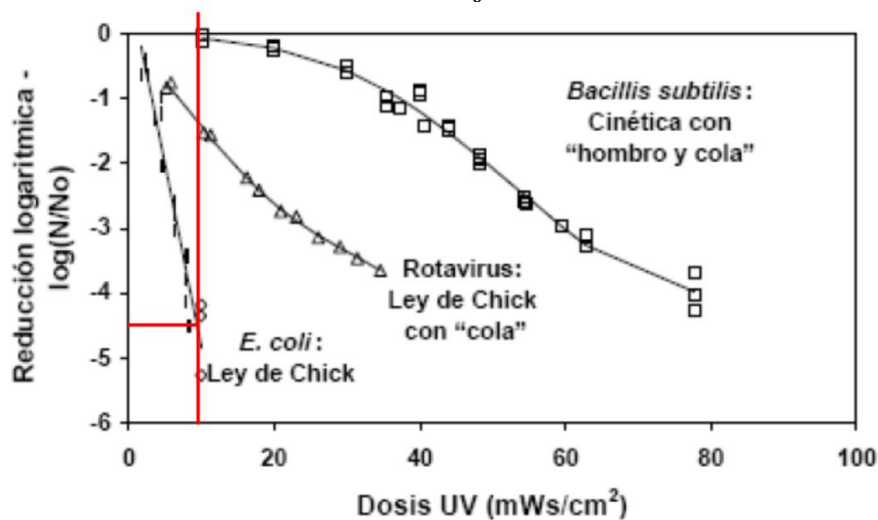


Figura 30. Leyes de reducción de la concentración para distintos tipos de microorganismos , tomada de [2]

De acuerdo con la Figura 30, para una reducción logarítmica de -4,5 de E. Coli se precisa una dosis de 10 mWs/cm^2 , 100 Ws/m^2 . Insertando estos datos en la ecuación de Watson-Chick se puede obtener la constante de inactivación de E. Coli:

$$-4,5 = -k \cdot 100$$

$$k_{E.Coli} = 0,045$$



Las desviaciones (“colas” y “hombros”) de la ley log-lineal se deben a la protección contra la radiación que ejercen ciertas partículas sobre los microorganismos. Estos efectos se explican en [1, p. 1306 y ss].

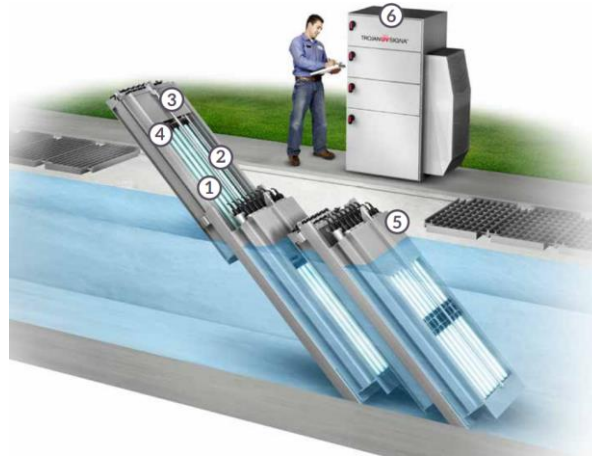


Figura 31. Disposición inclinada de módulos con lámparas UV en canal abierto. [Fuente: Trojan Technologies.](#)

En cuanto a las lámparas para la generación de radiación UV, estas se caracterizan en base a dos parámetros: presión e intensidad de salida, en base a los cuales se producen básicamente tres tipos de lámparas [20].

- > Baja presión/Baja intensidad: Menor consumo eléctrico. La baja intensidad de salida puede provocar la necesidad de instalar más lámparas, y, por tanto, la necesidad de más espacio. Se identifican como *LPLO, Low Pressure/Low Output*.
- > Baja presión/Alta intensidad: Rango medio en términos de eficiencia eléctrica/germicida. Se identifican como *LPHO, Low Pressure/High Output*.
- > Media presión: Las más potentes y efectivas en términos de acción germicida. Al ser más potentes se requieren menos lámparas, y, por tanto, menos espacio. Tienen una vida útil menor que las lámparas de baja presión. Se identifican como *MP, Medium Pressure*.

Para esta depuradora se ha seleccionado una lámpara con las siguientes características:

Tabla 14. Características de lámpara UV

Modelo	HAL1000T5L
Tipo	Lámpara a baja presión de amalgama
Ø Tubo	15 mm
Longitud de Arco	921 mm
Potencia	127 W
Emisión UV a 254 nm	370 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ / 42 W



5.1.5.3.2 DESINFECCIÓN MEDIANTE CLORACIÓN

La adición de cloro se realizará en una arqueta de contacto abierta con disposición “laberíntica”, la cual permitirá una mezcla uniforme del desinfectante. El grado de desinfección con cloro se puede medir utilizando la siguiente expresión, obtenida por Collins en [21] y [22].

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{(1 + 0,23Ct)^3} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde,

N : nº de microorganismos a tiempo t

N_0 : nº de microorganismos inicial

Ct : Producto de concentración de desinfectante y tiempo, expresado en $\frac{mg}{L} \min$

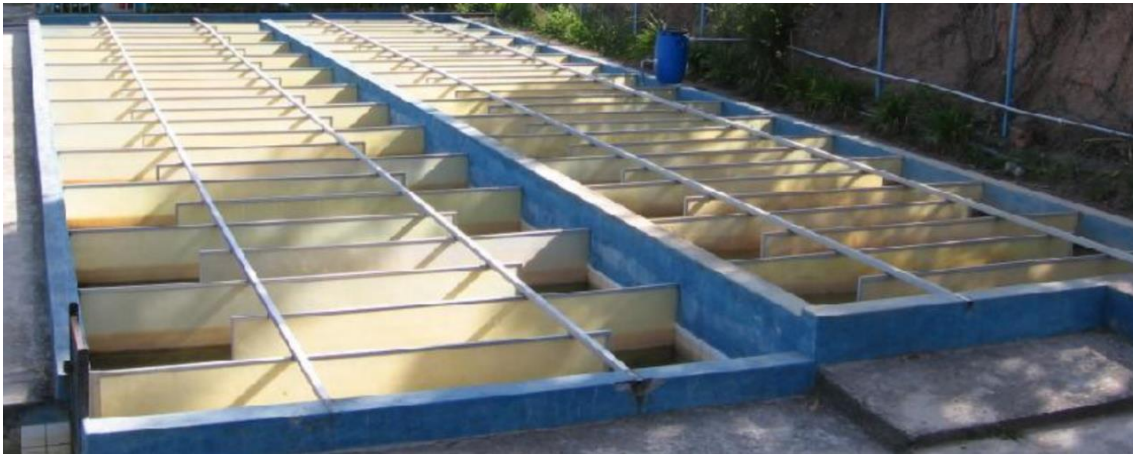


Figura 32. Arqueta de contacto con cloro

La desinfección química, y en particular la desinfección con cloro, presenta importantes desventajas respecto de la desinfección UV por los subproductos tóxicos que se generan, tales como trihalometanos, ácidos haloacéticos y halógenos orgánicos disueltos [2]. En consecuencia, tal y como se ha mencionado en el apartado 5.1.5.3, este medio de desinfección constituirá un recurso de emergencia en caso de fallo total o parcial del sistema UV.

Tabla 15. Equipos en el proceso de desinfección

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Bombas dosificadoras de cloro	0,5	3000
Medidores de PH	0,1	2000



5.1.6 RÉGIMEN HIDRÁULICO LA E.D.A.R.

El flujo de agua en la EDAR sea realiza por **gravedad** a partir de dos puntos de bombeo de elevación situados en cabecera y antes del filtro de arena. El estado del flujo queda definido por las **estructuras de control** (vertederos, compuertas...) que se van intercalando entre diferentes puntos de la EDAR.



Figura 33. Ejemplo de sección de control (vertedero) entre el desarenador y el canal de comunicación con el tanque de homogenización, tomada de [2].

En ese sentido, las estructuras permanentes de control de flujo son los vertederos, ya sean de pared delgada o de cresta ancha.

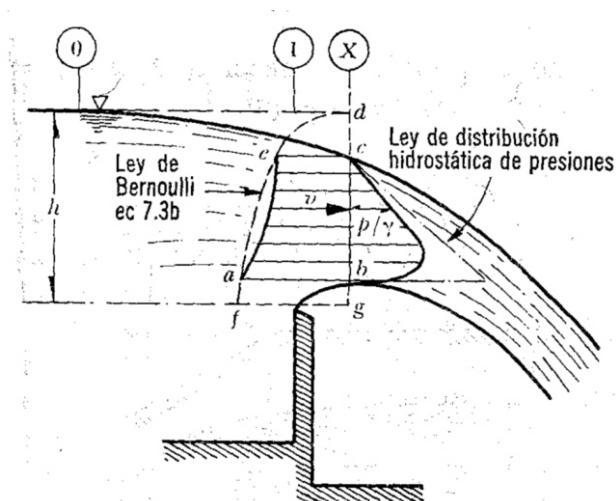


Figura 34. Esquema de flujo en un vertedero de pared delgada, tomada de [23, p. 243].



La ecuación que describe el flujo mostrado en la Figura 34, en caso de vertedero de sección rectangular, es la siguiente:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{3/2}$$
$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{3Q}{2\mu b \sqrt{2g}} \right)^2}$$

Ec. 27

Donde,

Q : Caudal

g : Aceleración gravitatoria

μ : Coeficiente de gasto

b : Ancho del vertedero

h : Altura de la lámina de agua sobre el labio del vertedero

En [23, p. 246] se recoge un listado de formulaciones propuestas por diversos autores, para diversas condiciones de contorno, que permiten estimar el coeficiente de gasto μ . Además, otras expresiones del coeficiente μ dadas en [23, p. 270] permiten utilizar la Ec. 27 para vertederos de cresta ancha.

Asumiendo condiciones de flujo uniforme, la relación entre la geometría del canal y la capacidad de desagüe viene determinada por la fórmula empírica de Manning, publicada en [24]:

$$I_e \approx I_n = \frac{n^2 Q^2}{A^2 R_h^{4/3}}$$

Ec. 28

Donde,

I_e : Pendiente de la línea de energía

I_n : Pendiente del canal

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

A : Área de la sección transversal del canal

R_h : Radio hidráulico de la sección transversal del canal

La ecuación de Manning describe la pérdida de carga en un canal de rugosidad “ n ”. Si no existiese rugosidad la velocidad de flujo aumentaría constantemente a lo largo del canal sin alcanzarse condiciones estacionarias. La ecuación describe por tanto el punto de equilibrio entre la geometría, pendiente y rugosidad del canal, y el caudal que circula por él en condiciones uniformes.



La estructura de descarga final es un canal que vierte en caída libre hacia un arroyo, según el esquema mostrado en la [Figura 35](#). Este esquema de flujo fue estudiado por Rouse en [\[25\]](#) y es un caso particular del mostrado en la [Figura 34](#) en el que la altura del labio del vertedero sobre la solera del canal es 0.

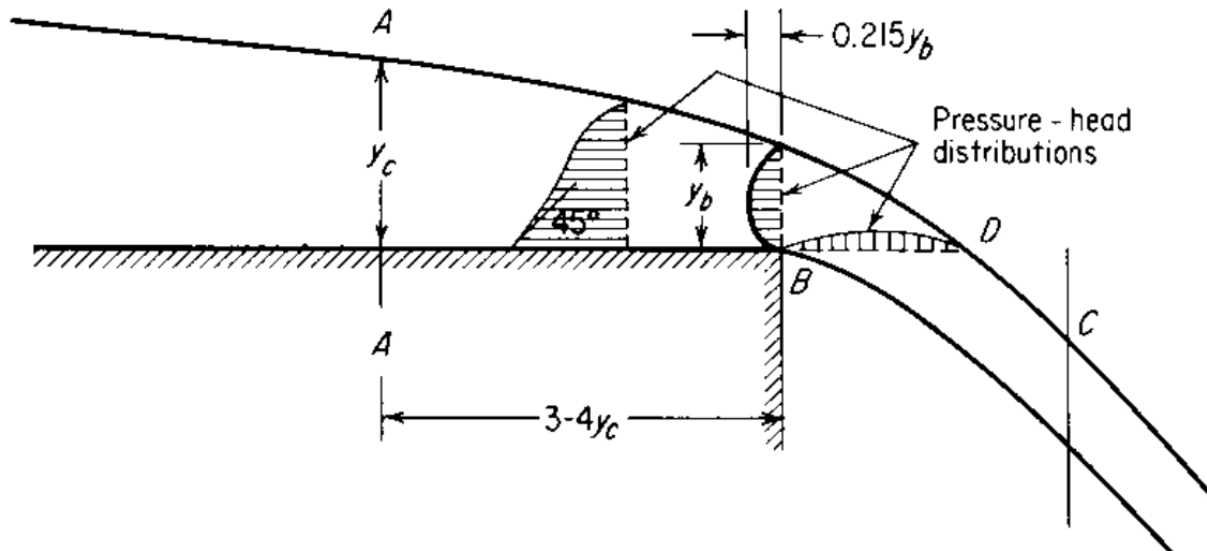


Figura 35. Esquema de flujo en caída libre, tomado de [\[26, p. 192\]](#).

Según Rouse en [\[25\]](#), la relación entre el calado en el borde del vertedero y_b y el calado crítico y_c se puede expresar según la [Ec. 29](#).

$$y_b = 0,715y_c \quad \text{Ec. 29}$$

El calado crítico y_c queda definido por la expresión que define el número de Froude en canales rectangulares:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gy}} \quad \text{Ec. 30}$$

Como el calado crítico es aquel para el cual se cumple que $F_r = 1$, se tiene que:

$$y_c = \frac{v^2}{g} = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 g}} \quad \text{Ec. 31}$$

La cota a la entrada de la EDAR es **+98,00** y la cota del punto de vertido es **+100,00**. A lo largo de la línea de agua se producirán pérdidas de carga que es necesario cuantificar para poder determinar la cota mínima necesaria a alcanzar tras los grupos de bombeo para cumplir con la cota establecida en el punto de vertido.



Se prevé instalar un grupo de bombeo justo después del desbaste de gruesos, y otro justo antes del filtro de arena. La planta se diseña para que toda la línea de agua funcione por gravedad a partir de estos dos puntos de bombeo.

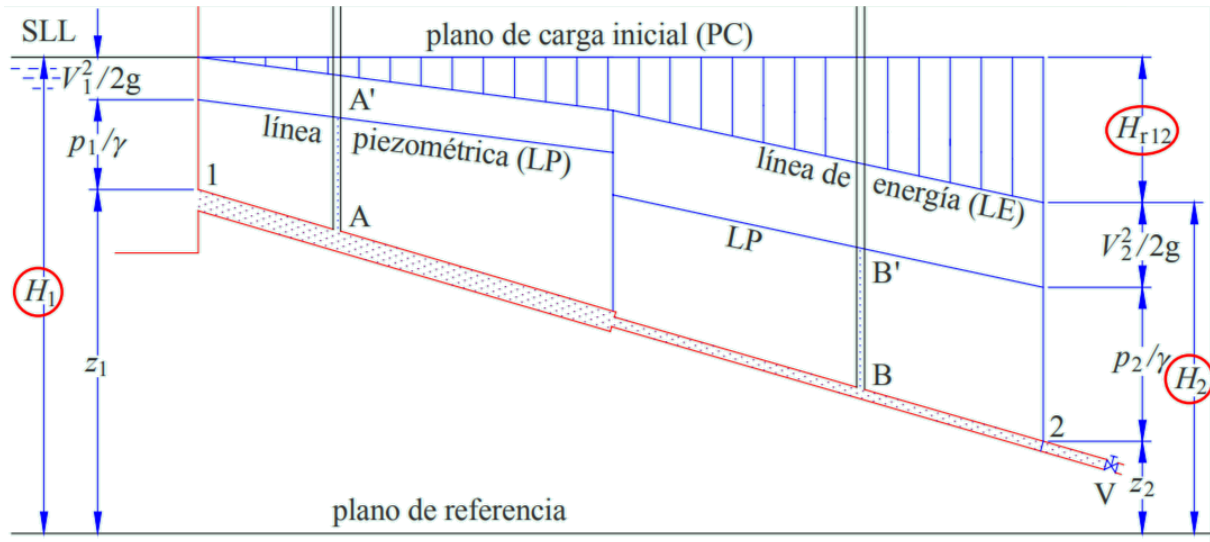


Figura 36. Representación de la transformación de la energía en un fluido en movimiento . Fuente: [Universidad de Córdoba](#).

5.1.6.1 TIPOS DE PÉRDIDAS DE CARGA

Las pérdidas de carga van asociadas siempre al movimiento del fluido, y son proporcionales al cuadrado de la velocidad y al coeficiente de rozamiento existente entre el fluido y el medio por el que circula; por ello, para calcular las pérdidas de carga de la instalación, se utilizará el **caudal punta** definido en la [Tabla 1](#).

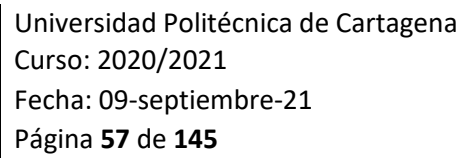
Para cuantificar la pérdida de carga total de la instalación en una primera aproximación nos vamos a fijar en las pérdidas de carga principales, que son las siguientes:

- > **Pérdidas en tuberías y rejillas:** por la elevada velocidad del fluido que se alcanza en estos puntos en comparación con los canales abiertos de poca o nula pendiente.
- > **Pérdidas en el filtro de arena:** aunque la velocidad de paso es reducida, el rozamiento es enorme.

5.2 LÍNEA DE FANGO

En el tratamiento de las aguas residuales se generan unos subproductos conocidos como fangos, en los que se concentra la mayor parte de la contaminación eliminada de las aguas [\[2\]](#). Los fangos están formados por:

- > Materia orgánica de carácter biodegradable
- > Patógenos



- El suministro de fangos bien mezclados con características consistentes a las unidades de tratamiento mejorará en gran medida la operatividad de la planta y el rendimiento [1], por lo que se dispondrá de una arqueta de mezclado de fangos antes de conducirlos al espesador.

5.2.1 ESPESADOR POR FLOTACIÓN

El objetivo del espesamiento de fangos es reducir el volumen de estos, y generalmente constituye la primera etapa del tratamiento. Se trata de un proceso físico por el que se elimina parte de la fracción líquida. En este proyecto se contempla la instalación de espesadores por flotación, en los que la separación de sólidos y líquido se induce introduciendo burbujas finas de gas (generalmente aire) en el sistema. Las burbujas de gas se adhieren a las partículas sólidas, formando un agregado gas-sólido con una densidad aparente global menor que la densidad del líquido; por lo tanto, estos agregados se elevan a la superficie del fluido. Una vez que las partículas sólidas han flotado a la superficie se recogen mediante barrido [27, p. 71].

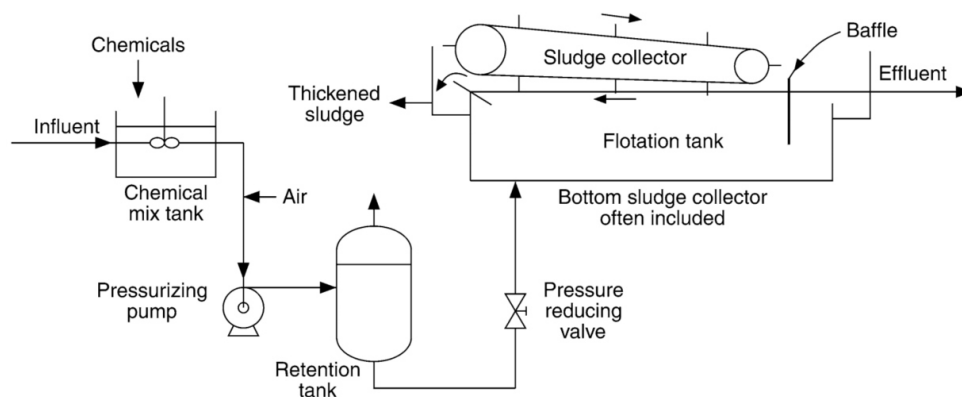


Figura 38. Diagrama de flujo en espesador de flotación, tomado de [27, p. 73]

Las principales ventajas de este sistema frente al espesamiento por gravedad son:

- a) Mejor separación de las fases líquida y sólida
- b) Menos olores
- c) Elimina grasas y finos

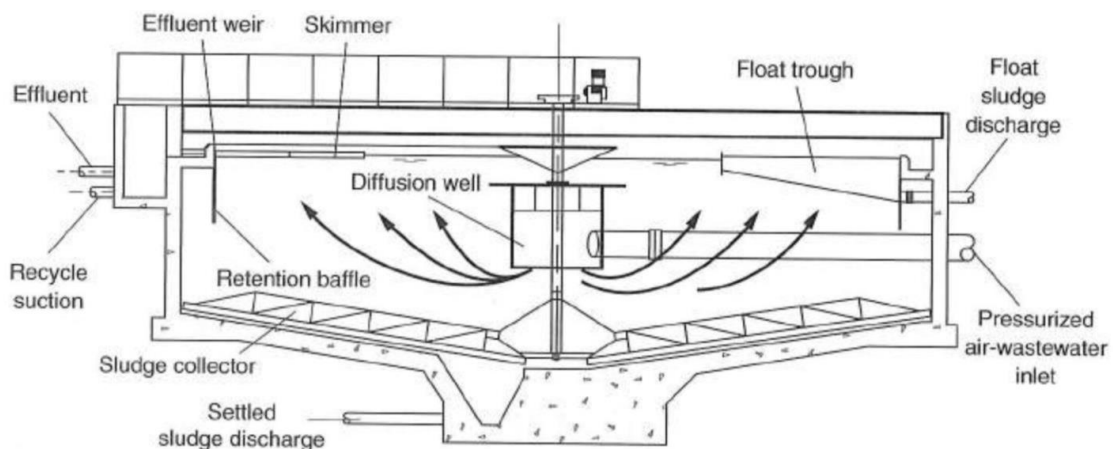


Figura 39. Espesador de fangos por flotación, tomado de [1, p. 1492]



Los componentes principales de un sistema de flotación mediante aire a presión (Figura 38) son:

- instalaciones de inyección de aire
- bomba de presurización
- tanque de retención de presión
- dispositivo regulador de contrapresión
- válvula de estrangulamiento
- unidad de flotación (tanque)

Las variables primarias para el diseño de flotación son presión, relación de reciclaje, concentración de sólidos de alimentación, periodo de detención, relación aire-sólidos y cargas sólidas e hidráulicas.

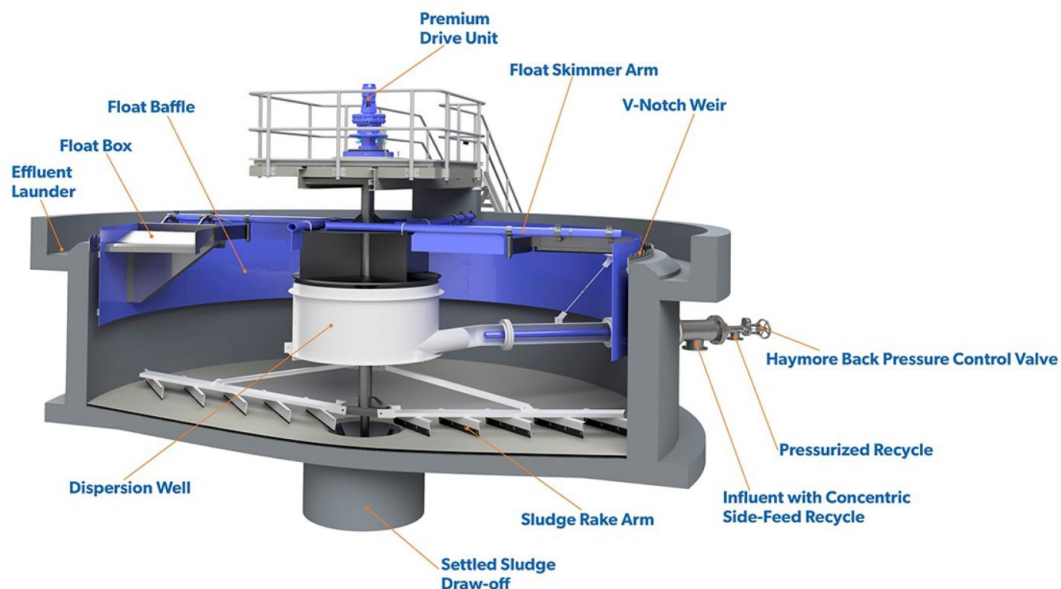


Figura 40. Espesador por flotación, tomado de [WesTech](#).

Tabla 16. Equipos en el espesador por flotación

Equipo	Potencia [kW]	Precio aproximado [€]
Bombas de presurización	20	20000
Motorreductor	10	15000



5.2.2 ESTABILIZACIÓN MEDIANTE DIGESTIÓN ANAEROBIA

El objetivo de la estabilización del fango es eliminar el potencial de putrefacción debido a la presencia de materia orgánica, así como reducir la presencia de patógenos y aumentar la eficiencia del proceso de deshidratación del fango.

En este proyecto se ha elegido la digestión anaerobia como método de estabilización de fango, que consiste en la degradación de la materia orgánica por medio de una fermentación bacteriana productora de metano, en un recinto cerrado y en ausencia de aire [2].

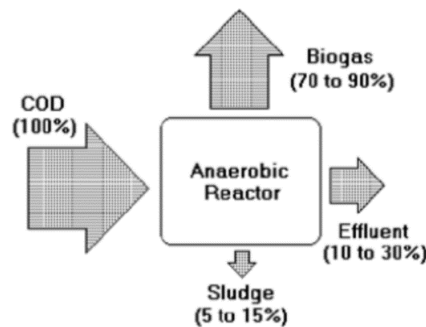


Figura 41. Conversión biológica en sistemas anaerobios. Tomado de [28]

En la Figura 41 se muestra un balance de masas orientativo para la materia orgánica. La digestión anaerobia es el único proceso de la EDAR en el que se destruye realmente materia orgánica (transformándose en biogás) de manera significativa, ya que en la digestión aerobia que tuvo lugar en el tratamiento secundario se eliminó sólo en torno a un 5% de la materia orgánica en el proceso de respiración endógena de los microorganismos.

5.2.2.1 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE PROCESO [1, p. 657]

El proceso de digestión anaerobia se divide en tres fases o subprocesos: hidrólisis, acidogénesis, metanogénesis, llevados a cabo por diferentes tipos de bacterias anaerobias.

- > **Hidrólisis.** Se trata del primer paso, en el que el material particulado se convierte en compuestos solubles que luego pueden hidrolizarse en monómeros simples que utilizan las bacterias que realizan la fermentación. La hidrólisis se lleva a cabo con enzimas extracelulares producidas por una variedad de anaerobios facultativos y estrictos. Los lípidos se descomponen en ácidos grasos de cadena larga (LCFA) por las lipasas producidas por bacterias que incluyen *Butyrivibrio sp.*, *Clostridium sp.* y *Anaerovibrio lipolytica*. Los péptidos y aminoácidos se deben a bacterias que presentan actividad proteasa extracelular, incluidas *Clostridium proteolyticum*, *Eubacterium sp.* y *Peptococcus anaerobicus*.

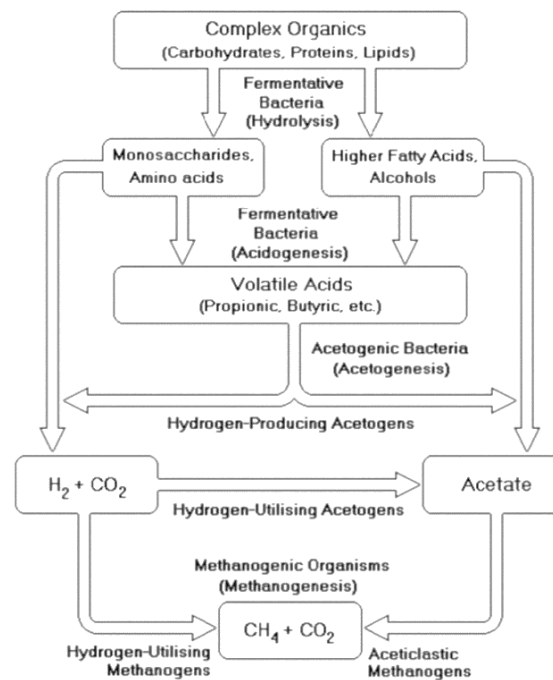


Figura 42. Proceso de generación de metano a partir de la digestión anaerobia de la materia orgánica, tomado de [28]

- > **Acidogénesis.** El segundo paso básico, que realizan las bacterias, es la acidogénesis (también denominada fermentación) y da como resultado la producción de AGV (ácidos grasos volátiles), CO_2 e hidrógeno. En el proceso de fermentación, los sustratos sirven como donantes y aceptores de electrones. Los principales productos de fermentación de los azúcares y aminoácidos son acetato, propionato, butirato, CO_2 e hidrógeno. La fermentación de los ácidos grasos de cadena larga da como resultado la producción de acetato, CO_2 e hidrógeno.
- > **Acetogénesis.** Se refiere a la fermentación adicional por parte de las bacterias para convertir los productos intermedios de la acidogénesis (propionato y butirato) para producir también acetato, CO_2 e hidrógeno. Así, los productos finales de la fermentación son acetato, hidrógeno y CO_2 , que son los precursores de la formación de metano. El cambio de energía libre asociado a la conversión de propionato y butirato en acetato e hidrógeno requiere que el hidrógeno esté en concentraciones bajas en el sistema ($\text{H}_2 < 10^{-4} \text{ atm}$), o la reacción no continuará. La mayor parte del hidrógeno producido proviene de la oxidación de ácidos grasos de cadena larga y AGV intermedios a ácido acético y se conoce como oxidación anaeróbica.
- > **Metanogénesis.** El tercer paso básico, la metanogénesis, lo lleva a cabo un grupo de organismos Archaea conocidos colectivamente como metanógenos. Dos grupos de organismos metanogénicos están involucrados en la producción de metano. Un grupo, denominado metanógenos acéticoelásticos, divide el acetato en metano y dióxido de carbono. El segundo grupo, denominado



metanógenos *hidrogenotróficos*, utiliza hidrógeno como electrón donante y CO_2 como aceptor de electrones para producir metano. Las bacterias dentro de los procesos anaeróbicos, denominadas acetógenos, también pueden usar CO_2 para oxidar hidrógeno y formar ácido acético. Sin embargo, el ácido acético se convertirá en metano, por lo que el impacto de esta reacción es menor. Aproximadamente el 72 por ciento del metano producido en la digestión anaeróbica proviene de la formación de acetato. La composición del gas producido a partir de una operación estable de fermentación y metanogénesis contiene típicamente alrededor de 65 por ciento de metano y 35 por ciento de CO_2 . Una fracción de lípidos más alta en los desechos da como resultado una fracción de metano más alta en el gas del digestor.

Parameter	Unit	Value	
		Range	Typical
Synthesis yield, Y_H			
Fermentation	g VSS/g COD	0.06–0.12	0.10
Methanogenesis	g VSS/g COD	0.02–0.06	0.04
Overall combined	g VSS/g COD	0.05–0.10	0.08
Decay coefficient, b_H			
Fermentation	g/g·d	0.02–0.06	0.04
Methanogenesis	g/g·d	0.01–0.04	0.02
Overall combined	g/g·d	0.02–0.04	0.03
Maximum specific growth rate, μ_m			
35°C	g/g·d	0.03–0.38	0.35
30°C	g/g·d	0.22–0.28	0.25
25°C	g/g·d	0.18–0.24	0.20
Half-velocity constant, K_s	mg COD/L	60–500	120
Methane			
Production at std. conditions	m ³ /kg CODr	—	0.35
Content of gas	%	60–70	65
Energy content at std.conditions	kJ/m ³	—	38,846

Figura 43. Coeficientes cinéticos para reacciones anaerobias, tomados de [1, p. 1093]

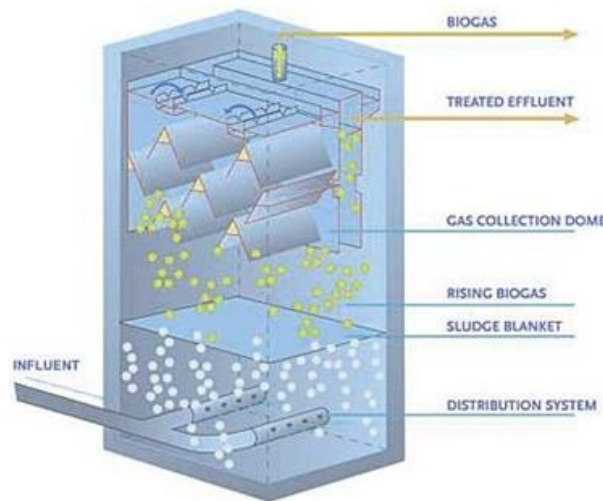
5.2.2.2 PROCESO UASB

El reactor elegido para realizar la digestión anaerobia de la materia orgánica es de tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), desarrollado en Holanda a principio de los años 80. [29]



Se trata de un reactor de contacto anaerobio de flujo ascendente con un lecho de fango en el fondo, en forma de biomasa granular densa. La concentración efectiva de fango anaeróbico en el reactor puede estar en el rango de 35 a 40 kg/m³.

El fango fluye hacia el fondo del tanque donde se acumula y forma gránulos en los que viven microorganismos que degradan los contaminantes orgánicos por digestión anaeróbica. El manto de fango se mantiene en suspensión por el régimen de flujo y se forman burbujas de gas. Un separador gas-líquido-sólido en la parte superior separa los sólidos granulares del efluente y recoge biogás. La capa de fango tiene un tiempo de retención de sólidos superior a 30 días con tiempos de retención hidráulica en el rango de 4 a 8 horas. Diseñado para una carga COD de 5 a 20 kg/m³·día. Las velocidades de flujo ascendente pueden variar de 1 a 6 m/h con alturas del reactor de 5 a 20 metros. [1, p. 1068] La acumulación de fango es baja (solo es necesario vaciarlo cada pocos años) [30].



El efluente del reactor UASB se dirige al proceso de fango activado con eliminación de nutrientes por vía biológica. Los ácidos grasos volátiles residuales en el efluente de UASB ayudarán al desempeño del proceso de eliminación de fósforo biológico mejorado en la planta municipal [1, p. 1072].

El grado de estabilización del fango se suele medir por la reducción porcentual de sólidos volátiles [1, p. 1509].

El estándar más importante de control es el pH dentro del reactor. El pH usual del tratamiento anaerobio es 6,5 a 7,5; por ello, el sistema debe contener alcalinidad apropiada para proveer capacidad adecuada para la producción de ácidos volátiles y CO₂ que se disolverán a la presión de operación. La alcalinidad es el estándar químico más importante para mantener condiciones estables en el proceso anaerobio. La relación de ácidos volátiles /alcalinidad debe ser menor de 0,4, pues cuando es superior a 0,4 se inhibe la producción de metano. [2]



El dimensionamiento de digestores anaerobios se basa en proveer un tiempo de residencia del fango suficiente para permitir una destrucción significativa de sólidos suspendidos volátiles. Los criterios de dimensionamiento son:

- a. Tiempo de retención de sólidos (tiempo medio de permanencia de los sólidos en el proceso digestivo)
- b. Tiempo de retención hidráulico

En caso de que no exista sistema de recirculación de sólidos, el tiempo de retención de sólidos es igual al tiempo de retención hidráulico.

Otros parámetros importantes para el diseño del reactor son:

- > **Temperatura:** el tiempo de retención necesario para la destrucción de una determinada cantidad de SSV depende de la temperatura del reactor. La mayoría de los reactores anaerobios operan en el rango de temperatura óptimo para las bacterias mesófilas, entre 30 y 38°C. La estabilidad de la temperatura es muy importante, ya que las bacterias son muy sensibles a las variaciones de esta.
- > **Alcalinidad:** para que el reactor funcione correctamente es necesario que la alcalinidad total se sitúe entre 2000 y 5000 mg/L [1, p. 1504]. Durante el tratamiento anaeróbico, se producen burbujas de gas que contienen un alto contenido de CO₂ (25 a 35 %) en el líquido a partir de reacciones de fermentación, lo que da como resultado una concentración elevada de CO₂ disuelto en el líquido. Por lo general, se necesita una alta concentración de alcalinidad, en el rango de 2000 a 4000 mg/L como CaCO₃, para compensar el ácido carbónico disuelto y mantener el pH neutro [1, p. 1077].

5.2.2.2.1 FANGOS EN EXCESO DEL REACTOR [31, PP. 104-105]

El sistema de descarga de fango está destinado a la eliminación periódica del exceso de fango producidos en el reactor, permitiendo también la eliminación de material inerte que puede acumularse en el fondo del reactor. Al menos dos puntos de extracción de lodos deben planificarse, uno cerca del fondo del reactor y otro aproximadamente de 1,0 a 1,5 m por encima del fondo (dependiendo de la altura de la digestión compartimento), para permitir una mayor flexibilidad operativa. Un diámetro mínimo de Se recomiendan 100 mm para la tubería de descarga de lodos.

La tasa de acumulación de sólidos depende esencialmente del tipo de efluente que se está tratando y es mayor cuando el agua residual tiene una mayor concentración de sólidos en suspensión, especialmente sólidos no biodegradables.



En el caso del tratamiento de efluentes solubles, la producción de fango en exceso es muy baja y generalmente se encuentran pocos problemas en el manejo, almacenamiento y disposición del fango. Como resultado de la baja producción y las altas concentraciones de fango en el reactor, los volúmenes vertidos también son muy pequeños en comparación con procesos aeróbicos.

Algunas características importantes de los fangos en exceso anaeróbicos son las siguientes:

- > Alto nivel de estabilidad debido al alto tiempo de retención de sólidos en el sistema de tratamiento, lo que permite que los lodos sean dirigidos a unidades de deshidratación sin ninguna etapa de tratamiento previa
- > Alta concentración, generalmente del orden del 3 al 5%, lo que permite la descarga de volúmenes más pequeños de lodos
- > Buena deshidratación
- > Posibilidad del uso del fango deshidratado como acondicionador del suelo en la agricultura, siempre que se tenga cuidado con la presencia de patógenos

5.2.2.3 CALEFACCIÓN DEL REACTOR

La temperatura del proceso afecta al rendimiento de este, ya que a distintas temperaturas proliferan distintas bacterias que degradan el fango. De la temperatura también depende el tiempo mínimo de digestión necesario para obtener una destrucción de sólidos volátiles eficaz. Dado que las bacterias presentes en el reactor son mesófilas se mantendrá la temperatura del reactor constante a 35°C. Para ello, se calentarán los fangos entrantes al reactor haciéndolos circular por intercambiadores de calor de flujo en espiral como el mostrado en la [Figura 44](#). El fluido caliente que alimentará el intercambiador será agua, calentada en una caldera por los gases producto de la combustión del metano en la unidad de cogeneración. Se dispondrá un cerramiento calorifugado alrededor de todo el reactor para minimizar la pérdida de energía.

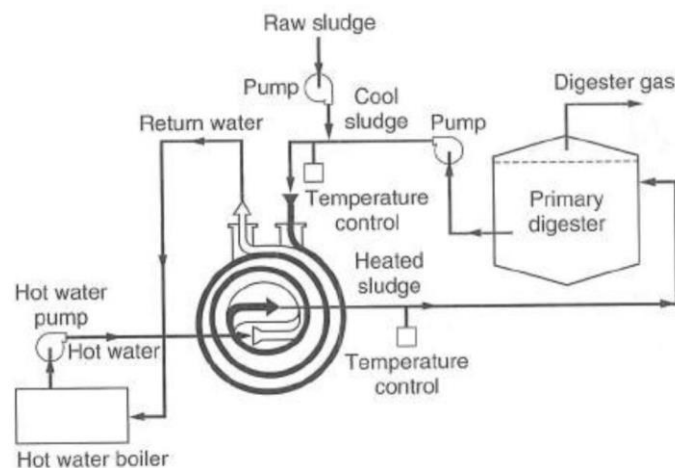


Figura 44. Esquema de calentamiento del fango con un intercambiador de calor de flujo en espiral, tomado de [1, p. 1529].



En resumen, las ventajas de la digestión anaerobia son las siguientes:

- > Buen porcentaje de eliminación de SV.
- > Reduce el volumen del fango.
- > Buena reducción de patógenos.
- > Fango final rico en nutrientes.
- > Producción de biogás

Sin embargo, presenta los siguientes inconvenientes:

- > Alto coste de inversión.
- > Muy sensible a cambios bruscos.
- > Sobrenadantes con alta carga de nitrógeno, sólidos en suspensión, DBO y DQO.
- > Medidas especiales de seguridad: Gas inflamable.

5.2.3 ACONDICIONAMIENTO, DESHIDRATACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE FANGOS

Los fangos en exceso del reactor UASB se bombearán a un último proceso de deshidratación antes de ser almacenados en el silo. Para mejorar la separación de las fases sólida y líquida se llevará a cabo el acondicionamiento químico del fango que se describe a continuación.

5.2.3.1 ACONDICIONAMIENTO QUÍMICO

Para una conseguir un adecuado nivel de deshidratación por medios mecánicos, con una concentración de entorno al 25% en peso, es necesario llevar a cabo un acondicionamiento químico previo, el cual consiste básicamente en flocular el fango.

Como el fango tiene carga eléctrica negativa, habitualmente se usan polímeros catiónicos solubles en agua para conseguir la floculación del fango [1, p. 1564]. La base de todos los polímeros comerciales usados como floculantes de fangos procedentes de aguas residuales urbanas (no industriales) es la poliacrilamida catiónica.

El fango y el polímero deben mezclarse uniformemente, cuidando de que la intensidad de mezclado no destruya los flóculos formados. Cuando la deshidratación se realiza mediante centrifugado, es habitual disponer mezcladores en línea.

5.2.3.2 DESHIDRATACIÓN MEDIANTE DECANTACIÓN POR CENTRIFUGADO

El método de deshidratación de fango seleccionado para esta planta es el centrifugado. Este método se basa en el principio de separación por diferencia de densidades utilizando la ley de sedimentación de Stokes, pero sustituyendo la aceleración de la gravedad “g” por la aceleración centrífuga “ w^2r ”, quedando la ecuación que describe la velocidad de sedimentación de la siguiente forma:



$$v_s = \frac{w^2 r (\rho_s - \rho_f) \phi^2}{18\mu}$$

Ec. 32

Donde

w : velocidad angular, $[T^{-1}]$

r : distancia al eje de rotación, $[L]$

$\rho_{s,f}$: densidad del sólido y del fluido, respectivamente, $[ML^{-3}]$

ϕ : diámetro de la partícula, $[L]$

μ : viscosidad dinámica, $[ML^{-1}T^{-1}]$

v_s : velocidad de sedimentación, $[LT^{-1}]$

Tal y como se desprende de la ecuación anterior, las partículas de mayor densidad (flóculos de fango) tienen una velocidad de sedimentación mayor que las menos densas (agua), por lo que, para cualquier instante “ t ”, las partículas de mayor densidad alcanzan una parte más alejada del eje de rotación que las menos densas. Tal y como se puede observar en la Figura 45, la hélice que recorre el cuerpo de la centrífuga tiene una abertura en la zona más próxima al eje de rotación, la cual permite el paso de agua, mientras en la parte más alejada al eje de rotación esta misma hélice arrastra el fango en dirección opuesta al agua.



Figura 45. Sección de centrífuga en operación. Tomado de [Alfa Laval](#).

Para este proyecto se ha seleccionado un decantador centrífugo de última generación tipo [X4E-4 Xelleter Series de Flottweg](#). El decantador cuenta con dos motores, uno para el tornillo sinfín (*scroll*) y otro para tambor (*bowl*). El tornillo y el tambor giran en sentidos opuestos.



Technical Data for the Flottweg Xelleter Series*			
Type	X4E-4	X5E-4	X7E-4
Materials	All wetted parts are made of rust-proof and acid-resistant stainless steel, e.g., 14463 (Duplex) and 1,4571 (AISI 316Ti).		
Dimensions (L x W x H)	3520 x 1140 x 1030 mm / 140" x 45" x 40"	4100 x 1550 x 1200 mm / 161" x 61" x 48"	4800 x 1720 x 1390 mm / 189" x 68" x 58"
Gross weight	2760 kg / 6100 lb	5030 kg / 11100 lb	8200 kg / 18100 lb
Motor for bowl drive	22 – 30 kW / 30 – 40 hp	45 – 75 kW / 60 – 100 hp	75 – 110 kW / 100 – 150 hp
Motor for scroll drive Flottweg Simp Drive®	7.5 – 11 kW / 10 – 15 hp	15 kW / 20 hp	30 kW / 40 hp
Capacity	20 – 50 m³/h / 90 – 220 gpm	30 – 70 m³/h / 130 – 300 gpm	60 – 140 m³/h / 260 – 600 gpm

Figura 46. Datos generales del decantador centrífugo

5.2.3.3 ALMACENAMIENTO DE FANGO

El fango deshidratado se enviará a silos en altura utilizando bombas tornillo-volumétricas con capacidad suficiente para 5 días o igual a la del camión que lo recogerá periódicamente.



5.3 LÍNEA DE GAS

El objetivo de la línea de gas es recoger y almacenar el gas, principalmente metano, que se genera como subproducto de la digestión anaerobia del fango, y disponer los equipos necesarios para su distribución y/o obtener energía a partir de su combustión.

EL biogás generado en la digestión anaerobia está formado esencialmente por la mezcla de los gases indicados en la Tabla 17.

Tabla 17. Gases constitutivos del biogás

Componente	Rango de proporciones
Metano CH ₄	55-75
Dióxido de carbono CO ₂	25-45
Nitrógeno N ₂	2-6
Hidrógeno H ₂	0,1-2
Sulfuro de hidrógeno H ₂ S	0,01-1

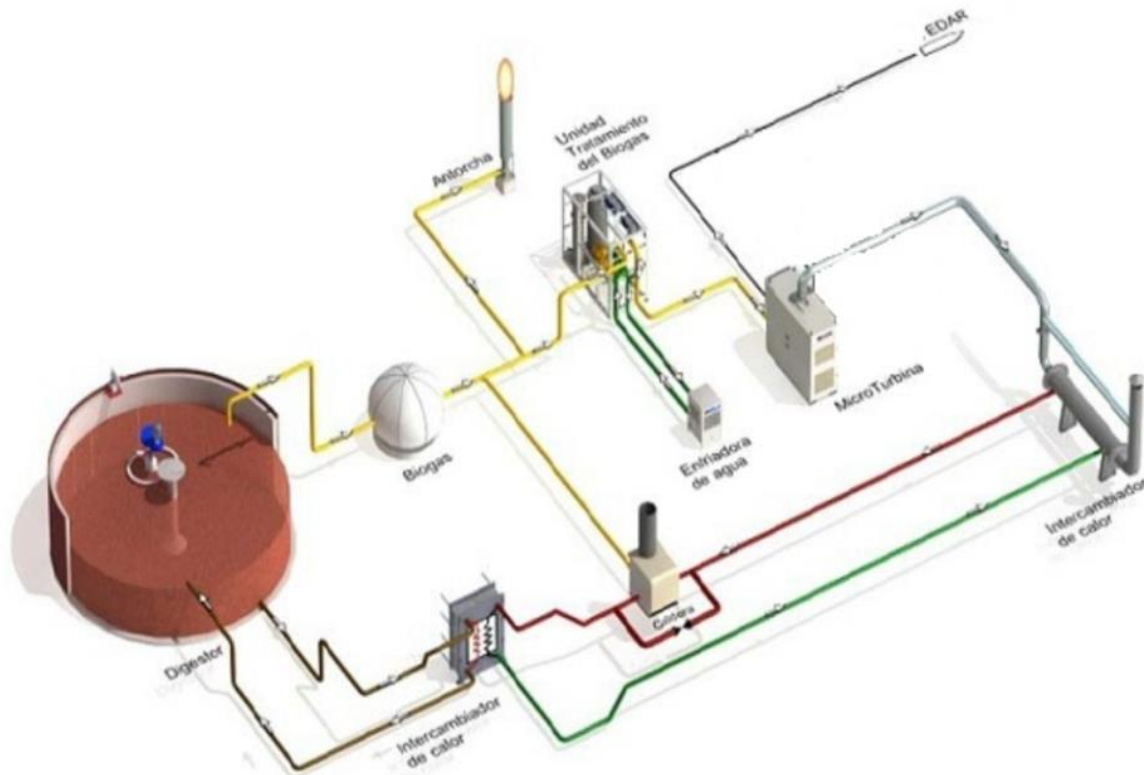


Figura 47. Esquema de la línea de gas y sistema de recuperación de calor, tomado de [32, p. 8].



5.3.1 PRODUCCIÓN DE GAS

De la DQO eliminada en el digestor, una parte se emplea en la producción de nueva biomasa y permanece en forma de tejido celular, por lo que la DQO *metanizable* será:

$$DQO_{total\ eliminada} - DQO_{de\ la\ masa\ celular}$$

5.3.2 RECOGIDA Y ALMACENAMIENTO DEL GAS

Como el gas sube a través del fango hasta la cúpula del digestor, es desde esta donde se evacua, siendo enviado al equipo correspondiente para su uso inmediato, almacenado para uso posterior o quemado en la antorcha.

Para ello se emplean los dos tipos de cubiertas: cubiertas fijas y cubiertas flotantes. Las cubiertas flotantes se ajustan sobre la superficie del contenido del digestor y permiten que varíe su volumen sin que se produzca la entrada de aire. Las cubiertas fijas proporcionan un espacio libre fijo, entre la cubierta del digestor y la superficie del líquido.

La succión del gas en el digestor debe realizarse a una altura mínima de 1,2 m del nivel máximo que pueda alcanzar el líquido en el digestor. Mantener esta distancia es conveniente para minimizar las cantidades de sólidos y espumas que entren en el sistema de tuberías de gas.

A la hora de diseñar la red de tuberías de gas, hay que tener en cuenta que, si se utiliza este en el sistema de mezcla, el flujo recirculado debe sumarse a la producción de gas diaria estimada. Así mismo, es conveniente no sobrepasar una velocidad del gas en las tuberías de 3,5 m/s, para mantener un nivel de pérdidas aceptable y prevenir el arrastre del condensado desde los sifones, lo que podría averiar válvulas, compresores, motores y otros equipos.

El gas recogido, debe mantenerse bajo una determinada presión para evitar la posibilidad de una explosión debida a una mezcla fortuita del gas con el aire. Las mezclas de aire y gas conteniendo concentraciones de metano de entre un 5 - 20%, son explosivas.

Dado que en la digestión anaerobia se produce gas dentro de un rango variable, cuando este va a utilizarse como combustible en la planta, es necesario disponer de un sistema de almacenamiento que equilibre la producción y la demanda. Esto hace necesario el uso de dispositivos de almacenamiento del gas de digestión. Es deseable disponer de una capacidad de almacenamiento de, al menos, el 25 - 33% de la producción de gas diaria.

Actualmente, existen dos formas de almacenar el gas, o bien a presión o bien en tanques de cubierta flotante.



- > Gasómetro de presión. El gas de digestión es extraído del digestor y enviado, por medio de compresores, a depósitos donde queda almacenado a presión hasta su uso posterior. El rango medio de presión de almacenamiento oscila entre 140 y 350 KPa.
- > Gasómetro de cubierta flotante. Almacenan el gas variando su altura según la cantidad de gas almacenado. Una serie de ruedas permiten a la cubierta deslizarse libremente hacia arriba o hacia abajo, según la cantidad de gas almacenado. Estas ruedas deslizan sobre unos perfiles de acero que actúan como guías. En ellos, el gas se mantiene a una presión baja, de alrededor de 200 mm de columna de agua. Consisten en una campana flotante construida de chapa de acero y de forma similar a la cubierta flotante de un digestor. Tienden a colocarse sobre los digestores y, en este caso, el fango actúa como cierre para evitar la fuga del gas almacenado en el interior.

El biogás generado se recoge en las cúpulas de los digestores y se almacena a baja presión en dos gasómetros de membrana. La presión de salida del biogás de los digestores está en torno a 220 mmca, lo que permite su transporte hasta los gasómetros sin necesidad de una bomba soplante intermedia.

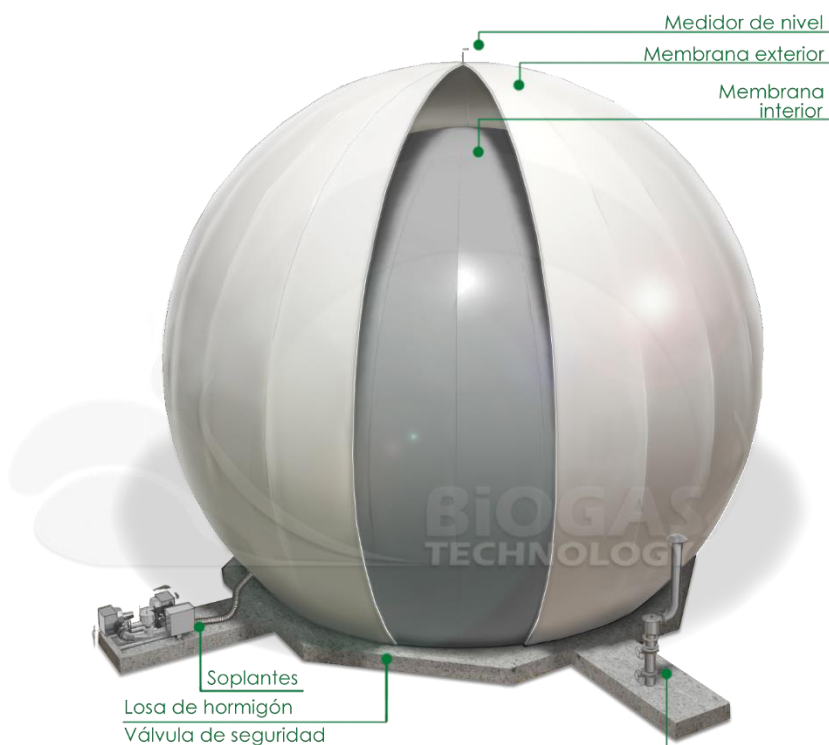


Figura 48. Gasómetro de membrana, tomado de [Biogás Technology](#).



5.3.3 PRETRATAMIENTO DEL GAS

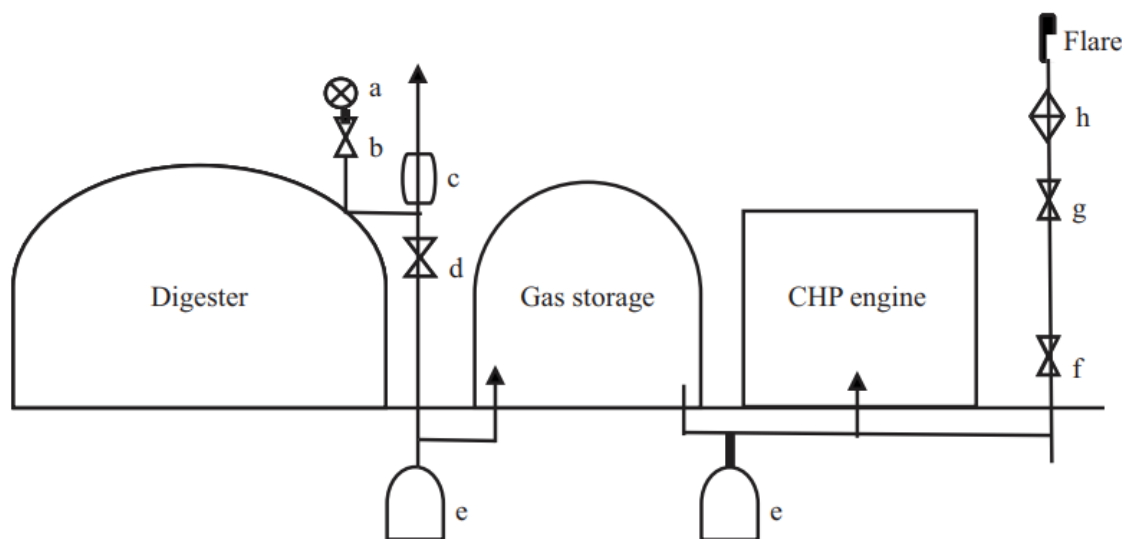
El gas producido en el digester contiene subproductos que es conveniente eliminar para conseguir una buena combustión en la turbina y reducir el riesgo de corrosión de las partes integrantes de la línea de gas. Dichos subproductos son fundamentalmente tres:

- > Vapor de agua
- > Sulfuro de hidrógeno
- > Siloxanos

A continuación, se describen los procesos llevados a cabo para eliminarlos.

5.3.3.1 ELIMINACIÓN DE HUMEDAD

El gas producido en el digester está saturado con vapor de agua, la cual perjudica la combustión, por lo que es necesario su eliminación. Para ello se utilizará un sistema de tuberías con trampas de sedimentos y trampas de goteo, donde quedará recogido el condensado. Estas trampas se ubican normalmente en la parte inferior de la instalación del digester, tal y como se muestra en la Figura 49.



Key:

- | | |
|------------------------|---|
| a. Air dosing pump | e. Condensing trap for moisture removal |
| b. Back-pressure valve | f. Check valve |
| c. Safety valve | g. Self-closing valve |
| d. Check valve | h. Flame trap |

Figura 49. Configuración esquemática del sistema de manejo de gas, tomada de [28, p. 74]



5.3.3.2 ELIMINACIÓN DE SULFURO DE HIDRÓGENO

El ácido sulfhídrico o sulfuro de hidrógeno es corrosivo, y a concentraciones superiores al 1% puede causar daños importantes en los sistemas de tuberías y equipos. El sulfuro de hidrógeno se combina con el condensado y forma un ácido sulfúrico débil. Se debe considerar que los materiales de las tuberías, como el acero inoxidable, resistan la corrosión y la erosión que puede causar el condensado ligeramente ácido. Se elimina una cantidad significativa de ácido sulfhídrico junto con el condensado.

Esta eliminación puede ser adecuada para algunos usos de gas digestor como calderas, aunque incluso entonces la caldera puede incurrir en mantenimiento adicional debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno.

Se utilizan comúnmente varios sistemas para eliminar el sulfuro de hidrógeno del gas del digestor. Los sistemas que eliminan la humedad mediante enfriamiento también eliminarán una cantidad significativa de sulfuro de hidrógeno en el condensado. Sin embargo, se debe evaluar la consideración del manejo del condensado. Si se devuelve a la planta de tratamiento, se debe considerar el destino final del ácido sulfhídrico.

5.3.3.3 ELIMINACIÓN DE SILOXANOS [1, P. 1523]

Los siloxanos son compuestos orgánicos volátiles que contienen silicio. Los siloxanos se utilizan como portadores o acondicionadores en antitranspirantes, productos para el cuidado de la piel, desodorantes, jabones líquidos y productos para el cuidado del cabello y ahora son omnipresentes en el medio ambiente y las aguas residuales.

Son hidrófobos y tienden a adherirse al fango producido durante el tratamiento. Una vez en el digestor anaeróbico, las condiciones de mezcla y calentamiento tienden a hacer que los siloxanos se volatilicen en el gas del digestor. Dondequiera que se queme gas digestor, como en una caldera, motor o turbina, se forma dióxido de silicio (SiO_2), un polvo blanco inerte. El dióxido de silicio es el material base para vidrio, papel de lija y herramientas de esmerilado.

El dióxido de silicio puede acumularse en el equipo de combustión provocando un mantenimiento significativamente mayor o un fallo total del equipo.

Los procedimientos de muestreo y análisis de los siloxanos no se han estandarizado. Además, los niveles permitidos de siloxanos para equipos de uso de gas varían según el tipo y el fabricante del equipo.

Los siloxanos se pueden eliminar principalmente por condensado mediante enfriamiento o adsorción en un medio o carbón activado. Se ha determinado que el retorno del condensado a la planta de



tratamiento es aceptable, ya que una cantidad significativa de siloxano se eliminará de la planta a través de la volatilización de un tanque de aireación y en la disposición final de los sólidos.

Los siloxanos se pueden eliminar en combinación con dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno usando algunas de las técnicas de adsorción mencionadas anteriormente. La reducción de la temperatura y la presión del biogás también puede permitir que el compuesto se precipite en un líquido y luego se asiente en trampas de condensación, como se ilustra en la Figura 49 [28, p. 78].

5.3.4 COGENERACIÓN ENERGÉTICA [1, p. 1524]

La cogeneración se define generalmente como un sistema para generar electricidad y producir otra forma de energía (generalmente calor en forma de vapor o agua caliente). Los sistemas de cogeneración también se conocen como sistemas combinados de calor y energía (CHP). Los más comunes en las instalaciones de aguas residuales son los motores de combustión interna o las microturbinas conectadas a generadores.

El diseño de un sistema de cogeneración debe considerar las variaciones en la producción de gas, el uso de todo el gas o permitir el aprovechamiento ocasional del exceso de gas y la redundancia. Estas consideraciones también se ven afectadas por el coste de la electricidad. Será rentable proporcionar un sistema más robusto cuando los ahorros eléctricos sean mayores debido a tarifas eléctricas más altas. También se puede considerar el almacenamiento de gas cuando se anticipan grandes variaciones en la producción de gas (debido a cargas industriales o alimentación de material orgánico suplementario a los digestores anaeróbicos) o para maximizar la generación de electricidad en instalaciones donde las cargas eléctricas a la hora del día son significativamente más altas que las de las horas pico. El nivel de limpieza de gas requerido para los sistemas de cogeneración puede variar ampliamente y también debe tenerse en cuenta en el diseño del sistema.

El diseño de un sistema de cogeneración también debe considerar los impactos de la contaminación del aire. Varias jurisdicciones tienen restricciones importantes sobre la combustión de combustibles. Los aspectos de permisos para los sistemas de cogeneración pueden afectar la rentabilidad o la capacidad de implementar un sistema o dispositivo específico.

5.3.4.1 PODER CALORÍFICO

Se reproduce a continuación la definición dada en [33]: “Se define como poder calorífico de un combustible a la cantidad de calor que se obtiene de la oxidación completa, a presión atmosférica, de los componentes de la unidad de masa (o volumen) de dicho combustible. Habitualmente se expresa en las siguientes unidades:

- > Combustibles sólidos: kWh/kg.
- > Combustibles líquidos: kWh/kg o kWh/l.



- > Combustibles gaseosos: kWh/kg o kWh/Nm³.

En la combustión, por la oxidación del hidrógeno, se forma agua; además, los combustibles pueden tener un cierto grado de humedad en su composición; dependiendo del estado en que aparezca el agua en los humos, se distinguen dos tipos de poderes caloríficos:

- > Poder calorífico inferior (PCI): Es el calor que puede obtenerse en la combustión completa de la unidad de combustible, si en los productos de la combustión el agua está en forma de vapor. Una parte del calor generado en las oxidaciones se utiliza para evaporar el agua y por ello ese calor no se aprovecha.
- > Poder calorífico superior (PCS): Es el calor generado cuando en los productos de la combustión el agua aparece en forma líquida; es decir, que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del combustible.

Con las temperaturas de humos habituales el agua se evacua con estos en fase vapor, por lo que el poder calorífico más comúnmente utilizado es el inferior.”

6 GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Con el objetivo de reducir la huella de carbono de la instalación se plantean dos medios de generación de energía eléctrica:

- > Microturbinas movidas por la combustión del metano
- > Solar fotovoltaica

Aunque en la combustión del metano se genera CO₂, esta forma de producción de energía se puede considerar como renovable porque se genera a partir de un combustible que no se agota, sino que se obtiene de manera continua en el propio proceso de depuración.



6.1 MICROTURBINAS

La generación de energía eléctrica con una microturbina sigue el esquema presentado en la [Figura 50](#).

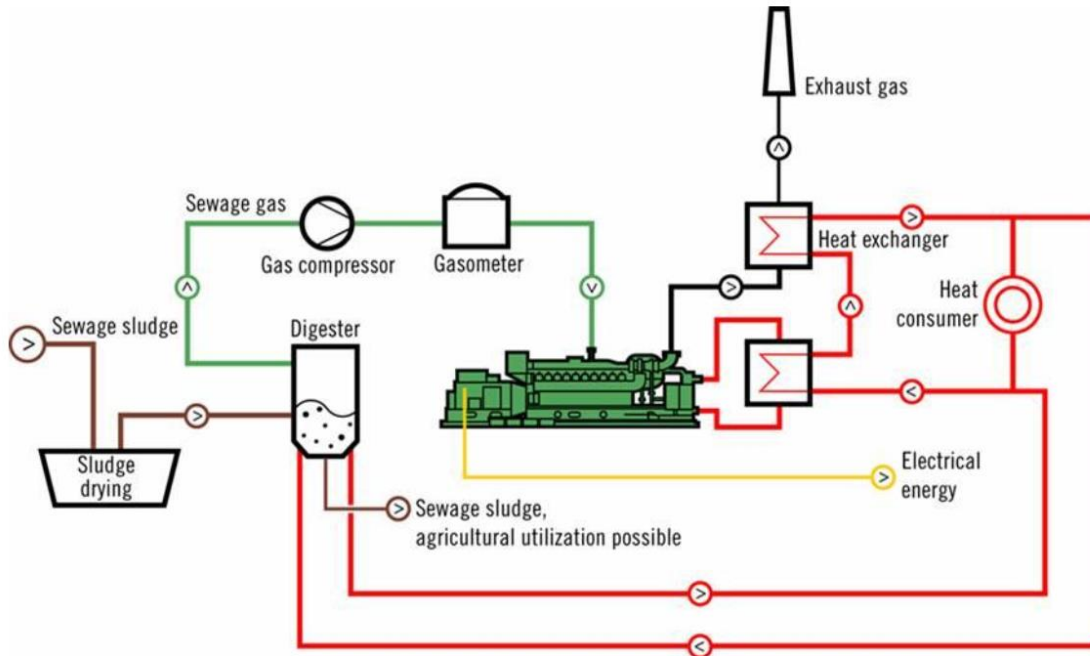


Figura 50. Esquema general de cogeneración, tomado de

En este proyecto se contempla la instalación de una microturbina de 200 kW, con las características indicadas en la Figura 51.

Electrical Performance⁽¹⁾

Electrical Power Output ⁽²⁾	200kW
Voltage	400/480 VAC
Electrical Service	3-Phase, 4 Wire Wye
Frequency	50/60 Hz
Electrical Efficiency LHV	33%

Fuel/Engine Characteristics⁽¹⁾

Digester Gas HHV	20.5– 32.6 MJ/m ³ (550–875 BTU/scf)
H ₂ S Content	< 5,000 ppmv
Inlet Pressure	517–552 kPa gauge (75–80 psig)
Fuel Flow HHV	2,400 MJ/hr (2,280,000 BTU/hr)
Net Heat Rate LHV	10.9 MJ/kWh (10,300 BTU/kWh)

Figura 51. Resumen de la hoja de datos de la microturbina Capstone C200S. Fuente: [Capstone](#).



Tabla 18. Datos generales del combustible de la microturbina

Fórmula	CH ₄
Masa molar [g/mol]	16,043
Poder calorífico inferior	802,3 kJ/mol 50 MJ/kg 32,85 MJ/m ³ a 20° y 1 atm
Densidad [kg/m ³] a 25° y 1 atm	0,657

De los datos anteriores se deduce:

Consumo	48,00 kg/hora
---------	---------------

6.2 INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

En este proyecto se contempla la implementación de una instalación fotovoltaica para autoconsumo conectada a la Red Pública, situada a efectos de cálculo en Murcia. Este procedimiento se especifica en el Código Técnico de la Edificación HE5 que establece:

La incorporación de sistemas de captación y transformación de energía solar en energía eléctrica por procedimientos fotovoltaicos para uso propio o suministro a la red.

El RD 244/2019 establece según la Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico, la clasificación de modalidades de autoconsumo:

- > **Autoconsumo sin excedentes** definida en el artículo 4 del Real Decreto 900/2015, donde se especifica que la conexión a Red tenga como único perfil de uso el de consumidor. Es decir, que dicho usuario no pueda verter a la Red, y, por tanto, no tiene la opción de ser productor de energía. los dispositivos físicos instalados impiden la inyección alguna de energía excedentaria a la red de transporte o distribución. En este caso existirá un único tipo de sujeto de los previstos en el artículo 6, que será el sujeto consumidor.
- > **Autoconsumo con excedentes:** Cuando las instalaciones de generación puedan, además de suministrar energía para autoconsumo, inyectar energía excedentaria en las redes de transporte y distribución. En estos casos existirán dos tipos de sujetos de los previstos en el artículo 6, el sujeto consumidor y el productor. Definida en el artículo 4 del Real Decreto 900/2015, donde se especifica que la conexión a Red tenga dos perfiles disponibles:



- Perfil de uso de **consumidor**. La Red le abastecerá de la energía que solicite dentro de los márgenes establecidos por la compañía distribuidora.
- Perfil de uso de **productor**. En este caso, el usuario podrá ceder parte de la energía producida a la Red dentro de los márgenes establecidos por la compañía distribuidora.

Con la presente instalación se conseguirá tanto un ahorro económico en la factura eléctrica como una disminución de emisiones contaminantes al medioambiente.

6.2.1 ESPACIO DISPONIBLE

Como no se cuenta con un terreno claramente definido para la implantación de la depuradora, se plantea en principio la posibilidad de cubrir las extensas áreas que ocupan los reactores biológicos, el canal de cloración, los decantadores lamelares y el edificio de control con paneles solares fotovoltaicos. Para cubrir estas áreas se pueden utilizar estructuras metálicas modulares elevadas a la altura suficiente como para que no interfieran con la operación y mantenimiento de los equipos instalados en ellas, y la vez provean los pasillos de acceso necesarios para la instalación y accesibilidad de la instalación fotovoltaica.

Tabla 19. Áreas consideradas para la instalación de placas fotovoltaicas

Áreas de instalación	Superficie [m ²]
Reactor biológico	1700
Edificio Control y salas bombeo	350
Laberinto cloración	278
Decantadores lamelares	378
Total	2706,4

Para el panel seleccionado, teniendo en cuenta su inclinación, estructura soporte, y pasillos de acceso se precisa un espacio libre de en torno a 4,5 m²/panel. Dado que hemos calculado un espacio libre de 2700 m² dispondremos un total de 600 paneles.

6.2.2 CONFIGURACIÓN ELÉCTRICA DE LA INSTALACIÓN

La configuración prevista para la instalación es de autoconsumo sin excedentes, y como tal deberá de disponer de un sistema anti vertido certificado que impida la inyección de energía excedentaria a la red.

La instalación cuenta con un total de 600 paneles fotovoltaicos de 400 W y seis inversores de 40 kW. La potencia pico de la instalación se calcula de la siguiente forma:

$$P_{pico\ total} = N^{\circ}_{paneles} \cdot P_{nom\ panel} = 240,00\ kW$$



Además, ha de cumplir una serie de características dependientes de la distribución de paneles y características internas de cada uno de los dispositivos.

Otra de las comprobaciones necesarias es el acoplamiento en tensión correcto entre cada regulador-inversor y las cadenas de módulos fotovoltaicos que lo alimenten. Cada cadena está formada por un número concreto de paneles en serie. Por ello, habrá que comprobar que la tensión máxima a la que se someta el regulador-inversor no supere su tensión máxima de funcionamiento al igual que la tensión máxima de cada cadena no supere la tensión máxima soportada por los paneles fotovoltaicos.

$$V_{DC \text{ máx regulador-inversor}} > N^{\circ}_{\text{paneles/cadena}} \cdot V_{OC \text{ panel}}$$

$$V_{Smáx \text{ panel}} > N^{\circ}_{\text{paneles/cadena}} \cdot V_{OC \text{ panel}}$$

La última de las condiciones necesarias a cumplir sería trabajar en niveles de corriente asumibles por el regulador-inversor. Para ello, se realiza el siguiente cálculo:

$$I_{DC \text{ máx regulador-inversor}} > N^{\circ}_{\text{cadenas/regulador-inversor}} \cdot I_{SC}$$

Por consiguiente, se han llegado a los resultados agrupados en la siguiente tabla en la que se muestran las comprobaciones citadas.

Definición	Potencia (kW)		Tensión máxima en DC (V)			Corriente máxima en DC (A)	
Modelo	Calculada	Reg-Inv.	Calculada	Reg-Inv	Paneles	Calculada	Reg-Inv
SUN2000-40KTL	40,00	45,00	1.035,18	1.100,00	1.500,00	51,78	88,00

6.2.3 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

6.2.3.1 MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Estos elementos son los encargados de obtener la energía solar a través de la radiación. Estos paneles proporcionarán una potencia en corriente continua proporcional a la radiación que le incida sobre las células fotovoltaicas.

Los módulos fotovoltaicos que se pretenden instalar en presente proyecto deberán de cumplir los siguientes requisitos básicos:

- > Han de estar diseñados y contruidos de forma que cumplan toda la normativa vigente de homologación.
- > Se procurará que la relación Precio/Wp sea lo más baja posible
- > Características eléctricas adecuadas: la tensión de máxima potencia, de circuito abierto, corriente de cortocircuito, máxima potencia y pico sean lo más similar posible, procurando que



se cumpla una tolerancia de estos parámetros de unos $\pm 3\%$ para grandes instalaciones y un $\pm 5\%$ para pequeñas.

- > TONC lo más bajo posible.
- > Facilidad de interconexión de módulos.
- > Facilidad de fijación del módulo a estructura soporte.

Las características se encuentran detalladas en la ficha técnica “Jinko Cheetah Perc 400M 144C”

6.2.3.2 INVERSORES

Los inversores propuestos trabajan conectando por la entrada cadenas de módulos fotovoltaicos (corriente continua o DC), y por la salida un cuadro eléctrico del que se distribuye tanto a un centro de transformación como al cuadro de distribución (ya trabajando en corriente alterna o AC). El centro de transformación, también llamado CT, sirve para adaptar la tensión de salida del inversor a la Red, permitiendo, además, el aislamiento galvánico entre la parte DC y la AC.

Los inversores deberán de cumplir los siguientes requisitos básicos:

- > Han de estar diseñados y contruidos de forma que cumplan toda la normativa vigente de homologación.
- > Abarcar el rango de trabajo de la instalación a abastecer tanto en tensión como en potencia máxima deseada.
- > Permitir la desconexión-conexión automática de la instalación fotovoltaica en caso de pérdida de tensión o frecuencia de la red, evitando el funcionamiento en isla, con lo cual se garantiza la seguridad de los operarios de la compañía distribuidora.
- > Deberá actuar como controlador permanente de aislamiento para la desconexión-conexión automática de la instalación fotovoltaica en caso de pérdida de resistencia de aislamiento.

Teniendo en cuenta los requerimientos anteriores, se ha decidido emplear 6 inversores con las características detalladas en la ficha técnica “SUN2000-333640KTL-US”.

6.2.3.3 MONITORIZACIÓN

El sistema de monitorización implementado en el sistema solar fotovoltaico vendrá equipado para la comunicación con una centralita que gestionará la instalación y la mostrará al usuario. Esta comunicación la realizará a través de un puerto de comunicación estándar (RS-485, RS-232, USB o similar) o bien mediante otro propietario que se encuentre correctamente normalizado y cumpla con las especificaciones básica de un puerto de comunicación homologado.

La información que este sistema debería de mostrar al usuario será al menos:

- > Tensión y corriente de entrada.
- > Potencia activa de salida y potencia de entrada.
- > Radiación y temperatura en el campo fotovoltaico (en el caso que contemos con medidores).
- > Energía total inyectada en la red.



- > Estado del sistema.

6.2.3.4 PROTECCIONES

La instalación ha de contar con los requerimientos que se exigen y están expuestos en el Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica al igual que el vigente Reglamento electrotécnico de baja tensión. Por ello, deberá de contar con los siguientes elementos de protección:

- > Un **elemento de corte general** que proporcione un aislamiento para la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente al riesgo eléctrico.
- > **Interruptor automático diferencial**, con el fin de proteger a las personas en el caso de derivación de algún elemento a tierra.
- > **Interruptor automático de la conexión**, para la desconexión-conexión automática de la instalación en caso de anomalía de tensión o frecuencia de la red, junto a un relé de enclavamiento.
- > **Protecciones** de la conexión máxima y mínima **frecuencia** (51 Hz y 48 Hz con una temporización máxima de 0,5 s y de mínima 3 s respectivamente) y máxima y mínima **tensión** (1,15 U_n y 0,85 U_n) como se recoge en la siguiente tabla que coincide con la Tabla 1 del RD 1699/2011.

Parámetro	Umbral de protección	Tiempo de actuación
Sobretensión-fase 1	$U_n +10\%$	Máximo 1,5s
Sobretensión-fase 2	$U_n +15\%$	Máximo 0,2s
Tensión mínima	$U_n -15\%$	Máximo 1,5s
Frecuencia máxima	51 Hz	Máximo 0,5s
Frecuencia mínima	48 Hz	Mínimo 3s

- > Desconector por tensión máxima homopolar caso de $1\text{kV} < \text{tensión} < 36\text{ kV}$

Estas protecciones irán sobre el interruptor general o sobre el interruptor del inversor.

Las protecciones deberán ser precintadas por la empresa distribuidora, tras las verificaciones necesarias sobre el sistema de conmutación y sobre la integración en el equipo generador de las funciones de protección.

Respecto a la puesta a tierra en instalaciones interconectadas, se hará siempre de forma que no se alteren las condiciones de puesta a tierra de la red de la empresa distribuidora evitándose así posibles transferencias de defectos a la red de distribución

La instalación deberá disponer de una separación galvánica entre la red de distribución y las instalaciones generadoras, bien sea por medio de un transformador de aislamiento o cualquier otro medio que cumpla las mismas funciones.



Las masas de la instalación de generación estarán conectadas a una tierra independiente de la del neutro de la empresa distribuidora y cumplirán con lo indicado en los reglamentos de seguridad y calidad industrial vigentes que sean de aplicación.

6.2.4 PRODUCCIÓN ENERGÉTICA ESPERADA

Una vez especificado el tipo de instalación fotovoltaica elegida, se procede a un estudio del emplazamiento. Este análisis tiene en cuenta los valores de radiación solar dependientes de:

- > La **situación**: España, Región de Murcia, Murcia (37° 56' Norte 1° 12' Oeste)
- > La **irradiación diaria dependiente de la fecha y la hora**. Como método de estudio se han utilizado para obtener los datos climáticos y su curva correspondiente, el sistema basado en "Localización geográfica de la instalación", el cual no deja de ser una simulación estimada del comportamiento al que más probablemente se enfrentase una instalación fotovoltaica en dicha ubicación.
- > En una fase más avanzada de diseño se realizará un estudio de sombras, inclinación y orientación de los paneles para determinar posibles pérdidas adicionales.

Ya llegados a la configuración final de la instalación, se procede a hacer una previsión de producción fotovoltaica teniendo en cuenta todos los parámetros descritos.

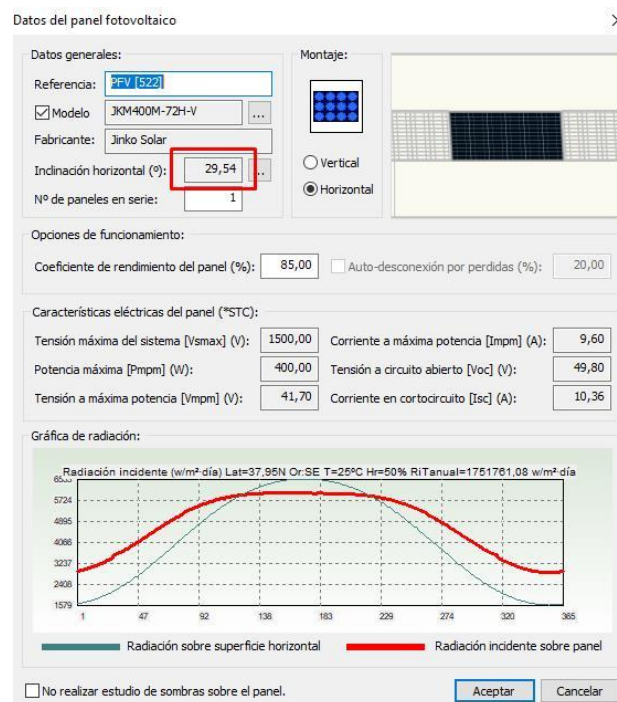


Figura 52. Cálculo de la inclinación óptima del panel fotovoltaico en ubicación geográfica seleccionada

A continuación, se muestra una tabla con comparativas de producción mensuales. Se puede destacar que el mes de mayor producción será mayo con 37.830,60 kWh. Sin embargo, el valor disminuye un



53,79 % en diciembre, siendo éste el mes más desfavorable en producción energética con 17.480,00 kWh.

Tabla 20. Producción energética diaria expresada en kWh por las placas fotovoltaicas

Día	Enero	Feb.	Mar.	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1	567	724	920	1122	1211	1221	1202	1175	1108	957	754	589
2	569	730	927	1126	1213	1221	1202	1174	1105	951	749	586
3	571	737	934	1132	1214	1220	1201	1173	1100	945	740	580
4	574	742	942	1136	1215	1219	1201	1172	1097	939	734	578
5	577	749	949	1140	1216	1219	1200	1171	1094	930	729	574
6	579	754	956	1144	1217	1218	1200	1169	1090	924	723	572
7	583	760	962	1148	1218	1218	1199	1168	1086	918	719	569
8	586	770	969	1152	1218	1217	1198	1167	1082	912	715	567
9	592	776	979	1156	1219	1216	1198	1165	1078	905	707	565
10	595	782	986	1160	1220	1216	1197	1163	1073	898	704	564
11	601	788	993	1163	1220	1215	1197	1162	1069	892	701	562
12	604	798	999	1167	1221	1214	1196	1160	1065	886	699	561
13	607	805	1006	1170	1221	1214	1195	1158	1060	880	674	560
14	614	813	1012	1174	1224	1213	1195	1156	1056	874	669	559
15	619	819	1018	1177	1224	1212	1194	1154	1052	867	664	558
16	622	827	1025	1177	1224	1212	1193	1152	1047	864	659	557
17	629	834	1031	1180	1224	1211	1192	1150	1043	858	654	557
18	634	841	1037	1183	1224	1210	1191	1147	1037	852	648	556
19	640	851	1044	1186	1224	1210	1191	1145	1034	843	643	556
20	645	859	1052	1189	1224	1209	1190	1142	1031	837	638	556
21	649	866	1058	1191	1224	1208	1189	1140	1016	830	634	556
22	654	873	1064	1194	1223	1207	1188	1137	1010	823	630	556
23	660	880	1080	1196	1223	1207	1187	1134	1005	814	624	557
24	667	889	1083	1198	1223	1206	1186	1131	998	808	620	557
25	673	896	1087	1200	1223	1205	1185	1128	992	802	614	558
26	678	898	1093	1202	1222	1204	1184	1125	986	795	611	559
27	683	907	1098	1204	1222	1204	1183	1121	981	789	607	560
28	689	914	1104	1206	1222	1203	1182	1121	974	782	601	561
29	715	0	1108	1208	1221	1202	1181	1117	968	775	597	562
30	718	0	1113	1210	1221	1201	1180	1114	963	769	595	564
31	721	0	1118	0	1220	0	1176	1111	0	761	0	566
Total	19516	22879	31745	35191	37831	36352	36950	35602	31298	26678	20053	17480



6.3 ESTIMACIÓN DE BALANCE ENERGÉTICO

En la gráfica mostrada en la Figura 53 se ha representado la demanda energética mensual prevista y la producción prevista sumando la fotovoltaica y la cogeneración.

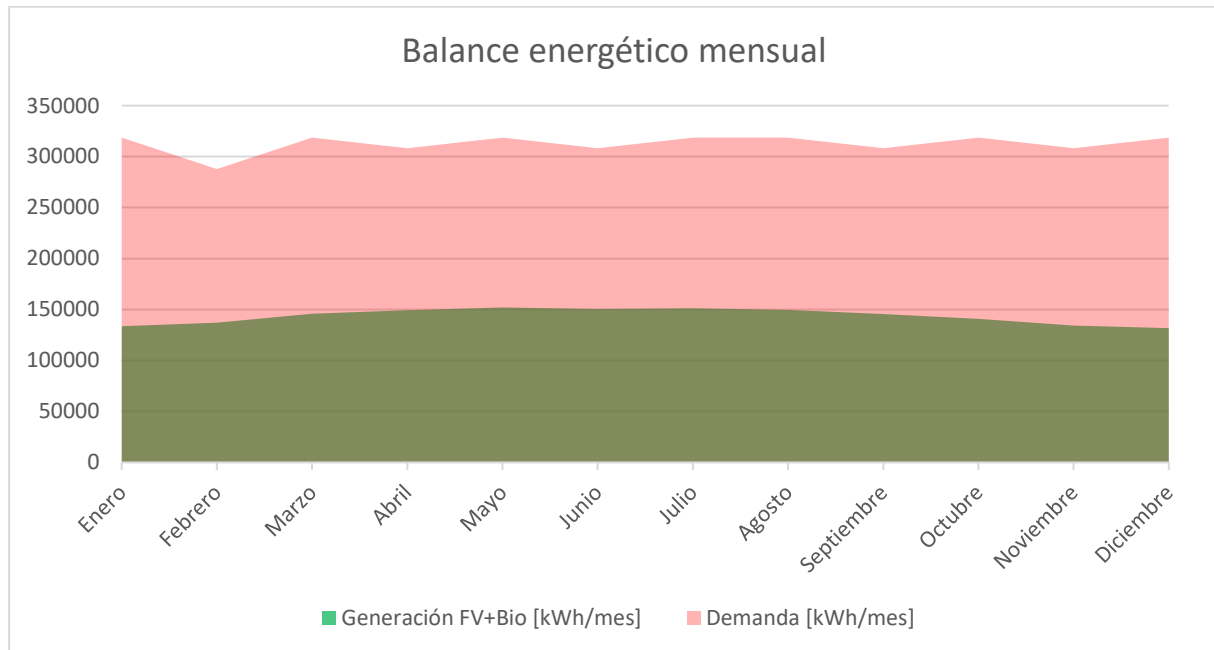


Figura 53. Balance energético mensual entre energía generada y energía demandada

7 INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE PLANTA

El sistema de telecontrol estará compuesto por los siguientes elementos:

- > Centros de Control
- > Estaciones Remotas

El Centro de Control tiene como función principal la supervisión y el control de la totalidad de las Estaciones Remotas del sistema, recibiendo los valores de medida y señalización auxiliar y enviando las correspondientes órdenes y valores de consigna. El Centro de Control Principal es el único que tendrá comunicación directa con dichas Estaciones Remotas, y ésta será realizada vía cable.

El Centro de Control se basará en un sistema compuesto por un puesto de control constituido por un ordenador personal, en el que reside el software de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (**SCADA**). Desde el Centro de Control se permite maniobrar los dispositivos instalados en las distintas estaciones, tanto de forma manual, desde el propio centro, como de forma automática, adquiriendo el control del proceso la CPU de la Estación Remota. Las funciones de supervisión serán realizadas a través de un ordenador, representándose gráficos sinópticos como los mostrados en la [Figura 54](#), listas de señales, diagramas de barras y curvas de tendencia, ofreciendo de este modo un



fiel reflejo del estado del sistema. Los gráficos sinópticos permitirán representar alarmas, usando cambios de colores de pantallas, así como los valores de las variables a controlar.

La misión de las estaciones remotas es la adquisición y control de las señales procedentes de los instrumentos captadores de campo y el posterior envío de esa información al software de supervisión residente en el Centro de Control, así como la actuación sobre dichos elementos de campo (como, por ejemplo, abrir o cerrar válvulas, paro/marcha de motores), todo ello de acuerdo al programa de lógica residente en su memoria. Entre las tareas que es capaz de realizar una Estación Remota se destacan las siguientes:

- > Controlar elementos maniobrables tales como bombas de aire y agua, compuertas, rejas, puentes, separadores, concentradores y agitadores, elementos que necesitan un programa de lógica local que les permita seguir funcionando autónomamente en el caso de pérdida de comunicación con el Centro de Control.

La lógica local (PLC) es implantable en la estación remota mediante herramientas software de programación, utilizando un lenguaje de alto nivel basado en diagramas lógicos y de contactos, fácilmente asimilable por el técnico programador. Las estaciones remotas cuentan con un software que permite trabajar al operador a nivel local para la depuración del programa PLC y la detección de fallos en la instrumentación.

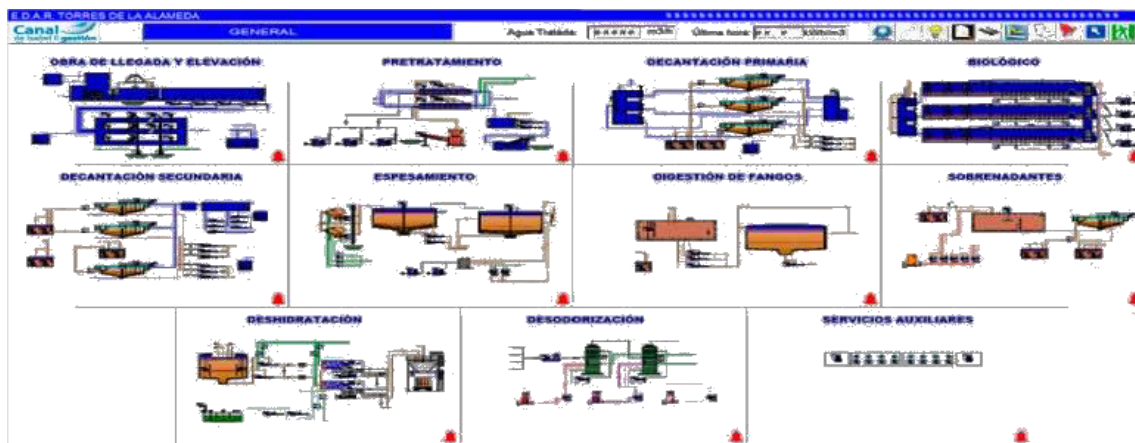


Figura 54. Interfaz del SCADA



8 RESUMEN DE DATOS DE LA E.D.A.R.

Datos generales	
Uso del agua previsto según RD 1620/2007	Calidad 2.1: Riego de cultivos contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco
Caudal medio [m ³ /día] / [h.e.]187	20007 / 187.000
DBO entrante [kg/día]	4001
Sólidos suspendidos totales entrantes [kg/día]	3901
Habitantes equivalentes	115.000
Vida útil [años]	25
Nivel de avenida en el cauce del punto de vertido T=500 años	102,00 (N.A.E.)
Cota terreno EDAR	100
Cota llegada colectores	98
Superficie terrenos necesaria [m ²]	18.000
I.D.T.	10,3
Línea de agua	
Tipo de proceso biológico	Cultivo en suspensión (Fango Activado) con eliminación biológica de nutrientes (A ² O)
Tipo de reactor biológico	Flujo en pistón
Filtración	Arena
Desinfección 1	Ultravioleta
Desinfección 2	Cloración
Línea de Fango	
Espesamiento de fangos	Flotación
Digestión de fango	Anaerobia, reactor UASB
Deshidratación de fangos	Decantación centrífuga
Fangos diarios primarios [m ³ /día]	156
Fangos diarios secundarios [m ³ /día]	215
Fangos diarios terciarios [m ³ /día]	-
Fango anual compostaje (25%) m ³ /año	2125
Línea de Gas	
Producción anual de biogás [Nm ³ /año]	1.439.164
Producción anual de metano [Tn/año]	587
Metano consumido cogeneración [Tn/año]	420
Metano quemado en antorcha [Tn/año]	166
Potencia y Energía	
Potencia instalada equipos consumidores [kW]	323
Potencia instalada fotovoltaica [kW]	240
Potencia instalada microturbinas [kW]	200
Energía media diaria consumida [kWh/día]	7038
Energía anual consumida total [MWh/año]	2569
Energía anual generada (fotovoltaica) [MWh/año]	352
Energía anual generada (biogás) [MWh/año]	1370
Déficit energético [MWh/año]	847
Costes	
De ejecución y puesta en marcha	7.544.067,00 €
De operación y mantenimiento año 1	183.349,87 €
De operación y mantenimiento año 2	191.349,87 €
De operación y mantenimiento año 3	199.349,87 €
De operación y mantenimiento año 4	207.349,87 €
De operación y mantenimiento año 5	215.349,87 €



9 CONCLUSIONES

Inmersos en pleno proceso de descarbonización de la economía, y de implementación de filosofías de gestión de recursos basadas en criterios de economía circular, se hace perentorio para los diseñadores de plantas de depuración un cambio de mentalidad que redirija la percepción tradicional que se tiene de estas instalaciones hacia enfoques más amplios que conciban la totalidad de la planta como un *sistema de recuperación de energía y recursos*, o, más abreviadamente, una *biofactoría*.

Dicho cambio de mentalidad debe ir acompañado de una apertura al estudio de nuevas tecnologías y procesos emergentes (véase el [Anejo 1](#)) que minimicen el consumo energético y la ocupación de espacio, y maximicen la producción de combustible y el aprovechamiento de la energía solar, de forma que estas *biofactorías* lleguen a convertirse en productoras netas de energía limpia.

En relación al uso de modelos exclusivamente cinéticos para dimensionar los procesos de la EDAR, en especial el biológico, podemos concluir que en los procesos fisicoquímicos intervienen muchas más variables de las que somos capaces de cuantificar hoy en día, y lo que consideramos como constantes en el modelo son, en realidad, variables. Es decir, aun los modelos cinéticos más complejos son una simplificación excesivamente simple de la realidad. En ese sentido, resulta más práctico el uso de modelos empíricos, que, aunque basados en coeficientes de cinética de reacciones, se ajustan para que sus predicciones concuerden con la realidad.

La EDAR diseñada en este proyecto tiene un I.D.T. (véase el [Anejo 1.1](#)) de 10,3; valor que se sitúa en torno a la media de las depuradoras españolas de tamaño medio/grande.

REFERENCIAS CITADAS

- [1] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 5ª ed., Nueva York: McGRAW-HILL Education, 2014.
- [2] J. T. García Bermejo, *Apuntes de Ingeniería Sanitaria*, Cartagena: UPCT, 2020.
- [3] L. K. Wang y et al, «Characteristics and Quantity of Biosolids,» de *Biosolids Treatment Processes*, Totowa, New Jersey, Humana Press Inc., 2007.
- [4] K. M. Yao, «Theoretical Study of High-Rate Sedimentation,» *Water Pollution Control Federation*, vol. 42, nº 2, pp. 218-228, Febrero, 1970.



- [5] J. Monod, «Recherches sur la croissance des Cultures Bactériennes,» 1942.
- [6] J. Monod, «The Growth of Bacterial Cultures,» *Annual Review of Microbiology*, vol. 3, pp. 371-394, 1949.
- [7] P. A. Moreno-Casas y G. D. Reed, «Evaluation of the Operating Performance of Conventional versus Flocculator Secondary Clarifiers at the Kuwahee Wastewater Treatment Plant, Knoxville, Tennessee,» *Water Environment Research*, May 2007.
- [8] A. G. Ghawi y J. Kris, «Improvement performance of secondary clarifiers by a computational fluid dynamics model,» *Slovak Journal of Civil Engineering*, vol. XIX, nº 4, p. 11, 2011.
- [9] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), «STANDARD ATV-DVWK-A 131E Dimensioning of Single-Stage Activated Sludge Plants,» 2000.
- [10] J. H. Rushton, «Mixing of Liquids in Chemical Processing,» *Ind. Eng. Chem.*, vol. 44, nº 12, p. 2931–2936, 1952.
- [11] R. D. Letterman, «Influence of Rapid-Mix Parameters on Flocculation,» *American Water Works Association*), vol. 65, nº 11, pp. 716-722, 1973.
- [12] R. D. Letterman, *Water Quality and Treatment*, 5ª ed., Nueva York: McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [13] H. Rouse, «On the Resistance Coefficient-Reynolds Number Relationship for Fluid Flow through a Bed of Granular Material,» *Proc. Inst. Mech. Engrs*, vol. 153, pp. 154-161, 1945.
- [14] M. Turtoi, «Ultraviolet light potential for wastewater disinfection,» *Annals. Food Science and Technology*, vol. 14, nº 1, pp. 153-164, 2013.
- [15] H. E. Watson, «A Note on the Variation of the Rate of Disinfection with Change in the Concentration of the Disinfectant,» *The Journal of Hygiene*, vol. 8, pp. 536-542, 1908.
- [16] H. Chick, «An Investigation of the Laws of Disinfection,» *The Journal of Hygiene*, vol. 8, p. 92–158, 1908.
- [17] P. Bouguer, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, Paris: Claude Jombert, 1729.
- [18] J. H. Lambert, *Photometria sive de mensura et gradibus luminis, colorum et umbrae*, Augsburg: Eberhardt Klett, 1760.



- [19] A. Beer, «Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten,» *Annalen der Physik und Chemie*, vol. 86, p. 78–88, 1852.
- [20] Genesis Water Tech, «UV Treatment: How to Choose a UV System for Water Reuse in Your Facility,» 10 Enero 2020. [En línea]. Available: www.genesiswatertech.com. [Último acceso: 09 05 2021].
- [21] H. F. Collins, «Effects of Initial Mixing and Residence Time Distribution on the Efficiency of the Wastewater Chlorination Process,» de *California State Department of Health Annual Symposium*, Los Ángeles, 1970.
- [22] H. F. Collins y R. E. Selleck, «Process Kinetics of Wastewater Chlorination,» Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, 1972.
- [23] G. Sotelo Ávila, *Hidráulica General*, volumen 1, México D.F.: LIMUSA, 1974.
- [24] R. Manning, «On the flow of water in open channels and pipes,» *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, vol. 20, pp. 161-207, 1891.
- [25] H. Rouse, «Discharge characteristics of the free overfall,» *Civil Engineering*, vol. 6, p. 257, 1936.
- [26] F. M. Henderson, *Open Channel Flow*, Nueva York: Macmillan Publishing, 1966.
- [27] L. K. Wang y et al, «Flotation Thickening,» de *Handbook of Environmental Engineering, Volume 6: Biosolids Treatment Processes*, vol. Volume 6, Totowa, NJ, The Humana Press Inc, 2007, pp. 71-100.
- [28] J. C. Akunna, *Anaerobic waste-wastewater treatment and biogas plants: a practical handbook*, Boca Raton: CRC Press, 2019.
- [29] G. Lettinga y e. a. , «Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment,» *Biotechnol. Bioeng*, vol. 22, pp. 699-734, 1980.
- [30] Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, «Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox,» [En línea]. Available: <https://sswm.info/index.php/pt-pt>. [Último acceso: 17 04 2021].
- [31] C. A. de Lemos Chernicharo, *Anaerobic Reactors*, Londres: IWA Publishing, 2007.



- [32] E. Sanmartín Baños, «Simulación de una cogeneración basada en microturbinas de biogás en una E.D.A.R. urbana,» Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2010.
- [33] Asociación Técnica Española de Climatización, «Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes,» Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Madrid, 2010.
- [34] H. Ødegaard, «A road-map for energy-neutral wastewater treatment plants of the future based on compact technologies (including MBBR),» *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, vol. 10, nº 2, 2016.



Titulación: Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Asignatura: Trabajo Fin de Máster

Documento: Anejos

Alumno: Javier García García

Universidad Politécnica de Cartagena

Curso: 2020/2021

Fecha: 19-Agosto-21

Página **91** de **145**

ANEJOS



1 ESTADO DEL ARTE EN EL DISEÑO EDAR Y TENDENCIAS DE FUTURO

1.1 ESTADO DEL ARTE

A continuación, se listan las seis depuradoras más grandes de España, incluyendo al final la EDAR más grande de nuestra región, con el objetivo de aportar orden de magnitud en cuanto a las capacidades de tratamiento, ocupación de planta y tipo de proceso principal de depuración, así como la relación entre la capacidad de tratamiento y el área ocupada por la planta. Esta relación se puede concebir como una **medida indirecta del grado de desarrollo tecnológico** de la EDAR, o estado del arte, y sirve como base de comparación entre EDARs. El Índice de Desarrollo Tecnológico lo cuantificamos del siguiente modo:

$$IDT = \frac{\text{Caudal de diseño [h.e.]}}{\text{Área ocupada [m}^2\text{]}}$$

Naturalmente, este índice sólo tiene sentido utilizarlo como base de comparación entre plantas que ofrezcan el mismo nivel de prestaciones (eliminación DBO y nutrientes, desinfección, etc).

Tabla 21. Resumen EDARS España

Posición	Nombre	Provincia	Caudal de diseño [h.e.]	Parcela [m ²]	Proceso	I.D.T
1	Sur	Madrid	2.920.320	310000	F/A	9,42
2	Besos	Barcelona	2.843.750	45000	F/A	¿63,19?
3	El Prat	Barcelona	2.275.000	305000	F/A	7,46
4	La China	Madrid	1.900.800	206000	F/A	9,23
5	Butarque	Madrid	1.764.000	160000	F/A	11,03
6	Galindo	Bilbao	1.500.000	194000	F/A	7,73
18	Murcia Este	Murcia	833.000	78500	F/A	10,61

Excluyendo el resultado de relación de ocupación de la línea 2 de la Tabla 21 **se tiene una media de I.D.T. de 9,25** para las EDARs de tamaño medio/grande en España.

A continuación, se han recopilado vistas aéreas de las depuradoras listadas:



Figura 55. EDAR Sur (Madrid)

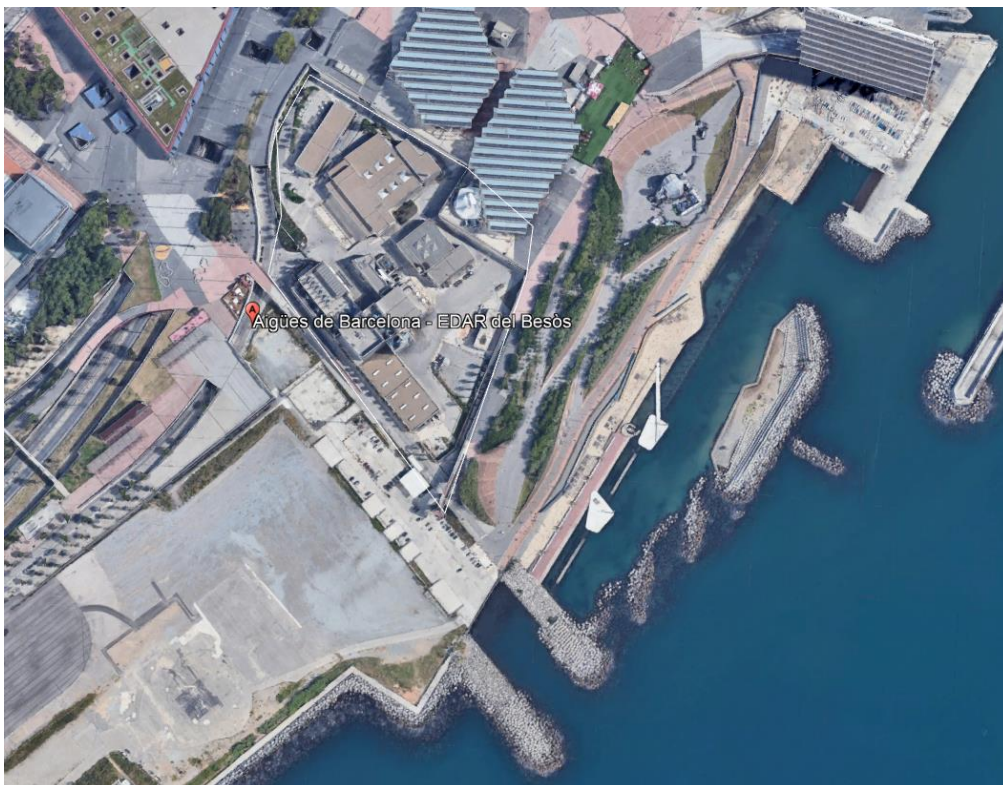


Figura 56. EDAR Besos



Figura 57. EDAR el Prat



Figura 58. EDAR la China



Figura 59. EDAR Butarque



Figura 60. EDAR Galindo



Figura 61. EDAR Murcia Este

1.2 TENDENCIAS DE FUTURO

Las tendencias de desarrollo de las EDAR se aglutinan principalmente en torno a tres campos:

- Aumento de la eficiencia de los equipos electromecánicos y mejoras en el telecontrol de la EDAR. Este campo queda restringido al ámbito de los fabricantes y la evolución tecnológica.
- Desarrollo de nuevos procesos para el tratamiento de los fangos o perfeccionamiento de los existentes.
- Desarrollo de nuevos procesos de depuración **compactos** con menores necesidades de aireación que los actuales, o perfeccionamiento de los existentes.

Los puntos b) y c) son campos abiertos a la investigación dentro del ámbito propio de los diseñadores de procesos para depuración de aguas, por lo que se comentan brevemente a continuación las principales líneas de investigación:

La ventaja inigualable del sistema de **biomasa adherida** sumergida es la **pequeña necesidad de espacio** para su implantación, en comparación con la necesaria para el tratamiento tradicional de fango activado con biomasa suspendida (de una tercera a una quinta parte menos [1, p. 946]).

Tal y como puede observarse en la [Tabla 34](#), los mayores consumidores de energía en una planta de depuración mediante fangos activados son los compresores aire. En ese sentido, la investigación para



el desarrollo de nuevos procesos de depuración debe ir encaminada a reducir las necesidades de aireación en estos. Para ello, Odegaard propone en [34, p. 2]:

- a) Implementar la **desamonificación** en lugar de procesos de nitrificación/desnitrificación para la eliminación de nitrógeno, combinada con procesos biológicos compactos para la eliminación de la materia orgánica en reactores de lecho móvil con biomasa adherida (**MBBR**, Moving Bed Biofilm Reactor).
- b) Separar una mayor cantidad de materia orgánica utilizando procesos físico químicos de coagulación-floculación antes de la etapa de eliminación de nitrógeno usando poco o nada de aire.

Además, para maximizar la producción de energía (biogás) se propone en [34, p. 15]:

- a) Utilizar procesos que minimicen la biodegradación de la materia orgánica previa a la digestión, y,
- b) Realizar un pretratamiento del fango mediante hidrólisis térmica.

Para mejorar la capacidad de reutilización de los fangos en agricultura se pueden implementar procesos que generen una cristalización controlada de la *estruvita*².

2 PARÁMETROS DE DISEÑO OBTENIDOS DE LOS ESTUDIOS DE SOLUCIONES PREVIAS

Los parámetros de diseño obtenidos de los Estudios de Soluciones Previas, a partir de los cuales se diseña la EDAR, se muestran en la [Tabla 22](#).

Tabla 22. Parámetros de diseño fijados por el Estudio de Soluciones Previas

Parámetro	Valor
Uso del agua previsto RD 1620/2007	Calidad 2.1: Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco
Caudal de diseño	20000 m ³ /día
Vida útil	25 años
Tipo de proceso biológico	Biomasa en suspensión (Fango Activado) con eliminación biológica de nutrientes (A ² O)
Tipo de reactor biológico	Flujo en pistón
M.M.N cauce T=50años	+100,00
Cota terreno EDAR	+100,00
Cota llegada colectores	+98,00
Factor punta	2

² <https://www.iagua.es/blogs/elena-rama/estruvita-el-problema-que-se-convirtio-en-solucion>



Tabla 23. Caudal horario

Caudal horario			
t(h)	Q (m³/h)	t(h)	Q (m³/h)
0,0	667,3	12,5	1025,4
0,5	634,5	13,0	1024,2
1,0	601,8	13,5	1024,2
1,5	589,6	14,0	1024,2
2,0	577,5	14,5	1019,6
2,5	563,0	15,0	1015,0
3,0	548,6	15,5	1000,8
3,5	511,5	16,0	986,7
4,0	474,4	16,5	965,4
4,5	451,5	17,0	944,2
5,0	428,7	17,5	925,8
5,5	469,0	18,0	907,5
6,0	509,4	18,5	902,1
6,5	597,4	19,0	896,7
7,0	685,3	19,5	911,7
7,5	776,8	20,0	926,7
8,0	868,3	20,5	953,8
8,5	935,8	21,0	980,8
9,0	1003,3	21,5	973,3
9,5	1029,2	22,0	965,8
10,0	1055,0	22,5	907,1
10,5	1049,2	23,0	848,3
11,0	1043,3	23,5	811,7
11,5	1035,0	24,0	775,0
12,0	1026,7	Total m³/día	20007,2

Tabla 24. Niveles de contaminación en al agua residual de entrada a planta y reducción requerida en el efluente

Constituyente	Símbolo	Entrada [mg/L]	Salida* mg/L]	Reducción requerida
Demanda bioquímica de oxígeno	DBO ₅	200	15	92,50%
DBO soluble	DBO _{sol}	100		
Demanda química de oxígeno	DQO	508	100	80,31%
DQO soluble	DQO _s	177		
DQO biodegradable soluble	DQO _{bs}	132		
Sólidos suspendidos totales	SSt	195	20	89,74%
Sólidos suspendidos volátiles	SSv	152		
Nitrógeno Kjeldahl total	NKT	35	10	71,43%
Amonio	NH ₄ -N	25		
Fósforo total	Pt	6	2	66,67%
Alcalinidad	CaCO ₃	140		
Temperatura [°C]	t	12	-	
Acetato	Acetato	15		
Escherichia Coli [UFC/L]	-	100000	1000	99,00%
Nemátodos intestinales [huevo/10L]	-	1000	1	99,90%
Nitrato	NO ₃	-	25	



Tabla 25. DQO fraccionada

DQO Fraccionada [mg/L]	
DQObs/DQOb	0,35
DQOb/DBO	1,6
DQOs	177
DQObs	112
DQOb	320
DQOnb	188
DQOnbs	65
DQOnbp	123
DQOns/SSv	2,18
SSvnb	56,48
SSi	43

Abreviaturas	
b	biodegradable
n	no
s	soluble
p	particular
v	volatil
t	total
i	inerte
SS	Sólido Suspendido

3 CARACTERÍSTICAS MÍNIMAS PARA LA REUTILIZACIÓN DE ACUERDO CON EL RD 1620-2007

El Real Decreto 1620/2007 tiene por objeto establecer el régimen jurídico para la reutilización de las aguas depuradas, de acuerdo con el artículo 109.1 del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por el Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

La reutilización de las aguas procedentes de un aprovechamiento requerirá concesión administrativa tal como establecen los artículos 59.1 y 109 del texto refundido Ley de Aguas.

Será aplicable a la reutilización el régimen jurídico establecido en las secciones 1.ª «La concesión de aguas en general» y 2.ª «Cesión de derechos al uso privativo de las aguas» del capítulo III del título IV del texto refundido de la Ley de Aguas.

En el caso de que la reutilización fuese solicitada por el titular de una autorización de vertido de aguas residuales, como es nuestro caso particular, se requerirá solamente una autorización administrativa

Las aguas regeneradas podrán utilizarse para los usos indicados en el anexo I.A de dicho decreto:



USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
2.- USOS AGRÍCOLAS¹					
CALIDAD 2.1² a) Riego de cultivos con sistema de aplicación del agua que permita el contacto directo del agua regenerada con las partes comestibles para alimentación humana en fresco.	1 huevo/10 L	100 UFC/100 mL Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases ³ con los siguientes valores: n = 10 m = 100 UFC/100 mL M = 1.000 UFC/100 mL c = 3	20 mg/L	10 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido de aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> 1.000 UFC/L (si existe riesgo de aerosolización) Es obligatorio llevar a cabo la detección de patógenos Presencia/Ausencia (Salmonella, etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=1.000

3.1 CONTRATOS DE CESIÓN DE DERECHOS SOBRE AGUAS REGENERADAS

El volumen anual susceptible de cesión no será superior al que figure en la concesión o autorización otorgada.

La Administración pública al autorizar el contrato suscrito, además de velar por el cumplimiento de los criterios previstos en el artículo 68.3 texto refundido de la Ley de Aguas, observará que se cumplen los criterios de calidad con relación a los usos a que se vayan a destinar los caudales cedidos.

3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA REUTILIZACIÓN DE AGUAS DEPURADAS

Las Administraciones Públicas estatal, autonómica o local, podrán llevar a cabo planes y programas de reutilización de aguas. En estos planes se establecerán las infraestructuras que permitan llevar a cabo la reutilización de los recursos hidráulicos obtenidos para su aplicación a los usos admitidos.

En dichos planes se especificará el análisis económico-financiero realizado y el sistema tarifario que corresponda aplicar en cada caso. Asimismo, estos planes y programas serán objeto del procedimiento de evaluación ambiental estratégica. Si la explotación se realiza de forma temporal o permanente por alguna de las administraciones públicas, la concesión o autorización de reutilización se otorgará a nombre de esta, o de la entidad o sociedad pública a quien se haya encomendado la ejecución de las infraestructuras o su explotación.

Cuando el titular de la autorización de vertido presente una solicitud para reutilizar las aguas se le otorgará una autorización administrativa, que tendrá el carácter de complementaria a la de vertido, en la que se establecerán los requisitos y condiciones en los que podrá llevarse a cabo la reutilización del agua.

Si, como es nuestro caso, se solicita la obtención de una autorización de vertido manifestando el propósito de reutilizar las aguas residuales, la autorización de reutilización quedará supeditada al otorgamiento de la autorización de vertido.

3.3 FRECUENCIA MÍNIMA DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE PARÁMETROS

Las frecuencias mínimas de análisis se especifican en la tabla siguiente:



Uso	Calidad	Nematodos Intestinales	Escherichia Coli	SS	Turbidez	NT y PT	Otros contaminantes	Otros criterios
1.- USO URBANO	1.1 y 1.2	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana	–		Mensual
2.- USO AGRARIO	2.1	Quincenal	Semanal	Semanal	Semanal	–		Mensual
	2.2	Quincenal	Semanal	Semanal	–	–		Quincenal
	2.3	Quincenal	Semanal	Semanal	–	–		–
3.- USO INDUSTRIAL	3.1	–	Semanal	Semanal	Semanal	–	El Organismo de cuenca valorará la frecuencia de análisis sobre la base de la autorización de vertido y del tratamiento de regeneración.	Mensual
	3.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	–		Legionella spp. 3 veces semana
4.- USO RECREATIVO	4.1	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana	–		–
	4.2	–	Semanal	Semanal	–	Mensual		–
5.- USO AMBIENTAL	5.1	–	2 veces semana	Semanal	–	Semanal		–
	5.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	Semanal		Semanal
	5.3	–	–	Semanal	–	–		–
	5.4							Frecuencia igual al uso más similar

Podemos observar cómo, para uso agrario, los nemátodos intestinales y las Escherichia Coli se analizarán semanalmente.

4 PLAN DE CONTROL DE CALIDAD SANITARIO

Debemos incluir un programa de control analítico que sea la base de dicho control de proceso y operación y permita realizar un seguimiento adecuado del sistema de tratamiento.

Se va a plantear a continuación un programa de control de calidad para el seguimiento de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de los distintos procesos de depuración y sistemas de tratamiento de aguas residuales.

El sistema que se propone permitirá determinar el rendimiento de cada una de las distintas etapas que forman el proceso de tratamiento, así como garantizar la calidad de los efluentes.

4.1 PUNTOS DE CONTROL Y TIPOS DE CONTROL DE LA EDAR

Para el control calidad del agua residual que ha sido regenerada, se fijan los siguientes puntos de control:

- > Salida de la EDAR
- > Inicio de la red de riego, a la salida de la balsa. Se dispondrán arquetas de toma de agua.

Además, se establecen dos tipos de control, en función tanto de los parámetros a analizar:

- > **De comprobación.** Se podrán realizar en los laboratorios existentes en las instalaciones de tratamiento o distribución y comprenderán las determinaciones relativas a parámetros indicados.



- > **De auditoría.** Serán realizados por un laboratorio o acreditado externo, y además de las determinaciones relacionadas en el caso anterior, deberán realizarse los correspondientes a sustancias potencialmente peligrosas.

4.1.1 CONTROLES DE COMPROBACIÓN

Se analizarán las muestras el mismo día de la toma, dentro de un plazo inferior a las tres horas. La gestión de muestras quedará reflejada en un registro de control al efecto, en el que se indicará el tipo de muestra, fecha y hora de toma, tipo de análisis y destino.

4.1.1.1 CONTROL FÍSICOQUÍMICO

4.1.1.1.1 LÍNEA DE AGUA

El control analítico mínimo programado en el influente será, **quincenalmente**, el siguiente: Se realizarán las siguientes analíticas:

- > Sólidos suspensión
- > DBO5 (mg/l)
- > DQO
- > Nitratos
- > Nitritos
- > Amonio
- > NTK
- > Nitrógeno total
- > Fósforo total.

4.1.1.1.2 LÍNEA DE FANGO

El plan de análisis mínimo, a nivel **semestral**, que se realizará es el siguiente:

Control de metales pesados del fango deshidratado (Níquel, Cobre, Cromo, Zinc, Cadmio, Plomo y Mercurio). Los valores límite de concentración de metales pesados en los lodos destinados a su utilización agraria son los siguientes:



(mg/kg de materia seca)

Parámetros	Valores límite	
	Suelos con Ph menor de 7	Suelos con Ph mayor de 7
Cadmio	20	40
Cobre	1.000	1.750
Níquel	300	400
Plomo	750	1.200
Zinc	2.500	4.000
Mercurio	16	25
Cromo	1.000	1.500

Figura 62. Valor límite de concentración de metales pesados en lodos

Los valores límites para las cantidades anuales de metales pesados que se podrán introducir en los suelos basándose en una media de diez años, son los siguientes:

(kg/Ha/año)

Parámetros	Valores límite
Cadmio	0,15
Cobre	12,00
Níquel	3,00
Plomo	15,00
Zinc	30,00
Mercurio	0,10
Cromo	3,00

Figura 63. Valores límites para cantidades anuales de metales pesados en suelos.

La toma de muestras estará a cargo del **Jefe de Planta** que es el responsable tanto de la frecuencia como del muestreo.

Los fangos serán retirados, por camión cada 7 días. En el caso de destinarse los fangos a la agricultura o a la producción de compost, su control se regirá por los planes de análisis establecidos en el R.D. 1.310/90, de 29 de octubre y la Orden de 26 de octubre de 1.993, por los que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.



4.1.1.2 CONTROL MICROBIOLOÓGICO

El sistema formado por el reactor biológico y la decantación secundaria es el corazón de una planta depuradora por fangos activados. El control de la microfauna que constituye el ecosistema del reactor biológico, así como de la sedimentación de la biomasa en el decantador es fundamental para conseguir y mantener la calidad del efluente secundario. Dentro del conjunto de factores que pueden perjudicar al rendimiento de depuración, dos de los más importantes son:

- La aparición excesiva de espumas, causadas por:
 - Detergentes
 - Desnitrificación
 - Proliferación masiva de determinados microorganismos filamentosos
- El esponjamiento del fango
 - Esponjamiento filamentoso: provocado por algún tipo de microorganismo filamentoso
 - Zoogleal (también llamado esponjamiento viscoso): Es originado por la síntesis excesiva de exopolímero celular



4.2 CONTROL DE AUDITORÍA

Para la reutilización de aguas en agricultura, la frecuencia de los ensayos a realizar para asegurar el cumplimiento de los parámetros de salida exigidos es:

Uso	Calidad	Nematodos Intestinales	<i>Escherichia Coli</i>	SS	Turbidez	NT y PT	Otros contaminantes	Otros criterios
1.- USO URBANO	1.1 y 1.2	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana	–		Mensual
2.- USO AGRARIO	2.1	Quincenal	Semanal	Semanal	Semanal	–		Mensual
	2.2	Quincenal	Semanal	Semanal	–	–		Quincenal
	2.3	Quincenal	Semanal	Semanal	–	–		–
3.- USO INDUSTRIAL	3.1	–	Semanal	Semanal	Semanal	–	El Organismo de cuenca valorará la frecuencia de análisis sobre la base de la autorización de vertido y del tratamiento de regeneración.	Mensual
	3.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	–		<i>Legionella spp.</i> 3 veces semana
4.- USO RECREATIVO	4.1	Quincenal	2 veces semana	Semanal	2 veces semana	–		–
	4.2	–	Semanal	Semanal	–	Mensual		–
5.- USO AMBIENTAL	5.1	–	2 veces semana	Semanal	–	Semanal		–
	5.2	Semanal	3 veces semana	Diaria	Diaria	Semanal		Semanal
	5.3	–	–	Semanal	–	–		–
	5.4							Frecuencia igual al uso más similar

Figura 64. Frecuencia de ensayos para reutilización de aguas en agricultura

Los controles se realizarán a la salida de la EDAR y a la salida de la red de riego.

4.3 CONTROL Y REGISTRO DE MUESTRAS

Es necesario tener en cuenta que algunas muestras tomadas podrán ser analizadas por laboratorios externos, lo que lleva a la utilización de un protocolo para la gestión y envío de muestras.

Procedimiento de envío de muestras:

- > La muestra estará debidamente identificada y/o etiquetada.
- > Se asignará un Nº de registro de salida indicando día/mes/año.
- > Los datos de entrega en un registro de control serán anotados.
- > Se notificará previamente al laboratorio receptor del envío de muestras, indicando tanto el tipo y parámetros de análisis solicitados como la propia fecha de envío.

Si las muestras son tomadas por empresas u Organismos Competentes autorizados, se anotarán igualmente los datos en el registro control de entrega a laboratorios externos.



4.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS

Huevos de nemátodos intestinales y de Cestodos:

- > Método de Bailinger modificado por Bouhoum & Schwartzbrod
- > Analysis of wastewater for use in agriculture. Ayres & Mara. OMS 1996

Escherichia Coli:

- > Método del Número Más Probable (NMP) A
- > Analysis of wastewater for use in agriculture. AYRES & MARA. OMS 1996.

Sólidos en suspensión a 0,45 micras, turbidez y Nitrógeno total:

- > Aquel método que garantice una exactitud, precisión y límite de detección inferiores o iguales al 25% de la concentración máxima admisible reglamentada.

Para el resto de los parámetros a analizar, habría que hacer uso de aquel método que garantice una exactitud, precisión y límite de detección inferiores o iguales a los establecidos en la Directiva 98/83/CE del Consejo.

Para aquellos parámetros que no estén citados explícitamente en dicha Directiva, la exactitud, precisión y límite de detección serán del 10% de la concentración máxima admisible para compuestos inorgánicos (sales y metales) y del 25% para el resto.

4.5 CRITERIOS DE CUMPLIMIENTO

La responsabilidad de los controles de comprobación recae en:

- a) El responsable del control de salida del tratamiento terciario
- b) El responsable del control en el punto de aplicación será la entidad distribuidora

La responsabilidad de los controles de auditoría recae en las autoridades competentes.

La calidad del agua se considerará adecuado al RD 1620/2007, del 17 de diciembre, si, los controles periódicos cumplen que:

- a) el 90% de las muestras no exceda del valor límite establecido de los parámetros:
- b) el 10% de las muestras que exceda del valor límite de los parámetros, no sobrepase el valor máximo de desviación establecido.

En caso de que los controles de comprobación superen alguno de los límites considerados en más de un 10% de las muestras, se duplicará la frecuencia de muestreo para el periodo siguiente. Por otra



parte, la autoridad sanitaria competente podrá suspender la concesión de reutilización hasta que se adopten las medidas adecuadas para asegurar la calidad del agua a reutilizar

Si el resultado en un control de comprobación supera en uno de los valores, al menos, los rangos máximos de desviación establecidos, se emplearán mecanismos similares a los indicados en el art 26 del R.D. 1138/1990 con comunicación a la autoridad sanitaria competente y a los usuarios.

También se incrementará al doble la frecuencia del control de comprobación hasta que los resultados de cuatro controles sucesivos muestren valores inferiores a los límites de rangos máximos citados. Finalmente, en caso de que en dos controles de comprobación sucesivos se superen los rangos máximos admisibles, se procederá a la inmediata suspensión de la reutilización.

No se deberá levantar la citada suspensión hasta que las autoridades así lo autoricen, una vez que se hayan tomado las medidas oportunas en lo relativo al tratamiento para que esta incidencia no pueda volver a suceder, y se haya constatado que el agua residual regenerada cumple de forma estacionaria todos los límites de calidad indicados en este documento.

4.6 DIFERENCIAS EN EL PROGRAMA DE CONTROL SANITARIO DEPENDIENDO DEL PERIODO DE TRATAMIENTO

Se distinguen tres períodos:

- > Puesta en Marcha
- > Inicio de Funcionamiento
- > Funcionamiento Normal

Durante la puesta en marcha se deberán realizar todas las pruebas de comprobación que se detallan en el presente documento dentro de la EDAR y no se exigirán ni garantizarán los parámetros de depuración del periodo de funcionamiento normal.

Durante el periodo de Inicio de Funcionamiento se realizarán los mismos análisis. Durante el periodo de funcionamiento normal no se exigirán ni tampoco garantizarán los parámetros de funcionamiento, hasta que no se alcancen los 21000 m³/día que consideramos como caudal mínimo operacional de acuerdo con el Anteproyecto.

Durante el funcionamiento normal se exigirá lo recogido en el presente documento.



5 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS DEL DISEÑO PROPUESTO

5.1 OBRA DE LLEGADA

Tabla 26. Cálculos pozo de gruesos

<i>Pozo de gruesos</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref ³
Caudal de diseño	<i>Qpunta</i>	m ³ /h	1667,27	
Cota lámina de agua entrada (constante en condiciones normales)		m	98,00	
Residuos en pozo de gruesos		kg/m ³	0,03	
Tiempo de retención (min)		minutos	3,50	
Resguardo		m	2,25	
Parámetro geométrico	h1	m	1,50	
Parámetro geométrico	h2	m	0,50	
Parámetro geométrico	a1	m	5,50	
Volumen mínimo (m ³)		m ³	97,26	
Altura del pozo		m	2,00	
Parámetro geométrico	V1	m ³	15,13	
Parámetro geométrico	V2	m ³	3,06	
Parámetro geométrico	A1	m ²	10,08	
Parámetro geométrico	A2	m ²	4,47	
Parámetro geométrico	a1	m	5,50	
Parámetro geométrico	a2	m	1,83	
Parámetro geométrico	b1	m	3,67	
Parámetro geométrico	b2	m	1,22	
Pesos de residuos extraídos diarios		kg/día	1200,43	
Velocidad ascensional (Q máx)		m/h	165,35	CUMPLE

Tabla 27. Cálculos desbaste de gruesos

<i>Desbaste gruesos</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref ³
Caudal de diseño	<i>Qmed</i>	m ³ /h	833,63	
Producción de residuos		kg/m ³	0,03	
Ancho de canal		m	2,30	
Ancho total de una reja		m	1,00	
Número de rejillas		ud	2,00	
Espesor de placas	d	mm	5,00	
Canto de la placa	z	mm	40,00	
Luz de paso. Entre placas.	e	mm	10,00	
Colmatación máxima	G	[-]	0,30	
Calado justo antes de la reja (constante)	h	mm	1000,00	
Número de placas		ud	67,00	
Ancho efectivo de paso		m	1,67	
Área de paso por la reja considerando colmatación		m ²	1,17	
Velocidad de paso por la reja	Vc	m/s	0,20	
k2			1,00	
e/e+d		[-]	0,67	
(z/4)*[2/e+1/h]		[-]	2,01	
k3			0,80	
k1		[-]	2,04	

³ Se refiere a [1] si no se indica otra cosa.



Pérdidas en la reja		m	3,28E-03	
Peso diario de residuos extraídos en reja		kg diarios	600,22	

Tabla 28. Cálculos pozo de bombeo

<i>Pozo de bombeo</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	<i>Qpunta</i>	m ³ /h	1667,27	
Número óptimo de bombas		ud	3,89	
Cota bombeo		m	96,00	
Nivel avenida 500 años		m	102,00	
Pérdida de energía hidráulica				

5.2 PRETRATAMIENTO

Tabla 29. Cálculos Reja de finos

<i>Reja de finos</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	<i>Qmáx</i>	m ³ /h	1025,42	
Número de canales	-	ud	2,00	
Producción de residuos en el tamiz		kg/m ³	0,03	
Ancho de canal (b)	a	m	0,50	
Ancho de rejillas (a)	b	m	0,00	
Separación entre rejillas	s	m	0,01	
Colmatación máxima	G	[-]	0,30	
Velocidad de paso		m/s	0,95	
Velocidad aproximación a la reja		m/s	0,50	
Longitud canal		m	2,00	
n (hormigón)		[-]	0,01	
k		[-]	1,00	
k2			1,00	
k3			1,30	
e/e+d		[-]	0,67	
(z/4)*[2/e+1/h]		[-]	0,25	
Radio hidráulico		m	0,18	
S		m ²	0,32	
i		m/m	0,00	
Pérdidas de carga canal aguas arriba tamiz		m	0,00	
Perdidas por expansión de flujo al final del canal Δh		m	0,01	
k1		[-]	2,04	
Pérdidas en la reja		m	0,03	
Peso diario de residuos extraídos en reja		kg/día	738,30	
Calado aguas abajo (H) Qmax		m	0,64	
Calado aguas arriba de la reja de finos		m	0,68	
Velocidad de circulación (Vc) Qmax		m/s	0,57	



Tabla 30. Cálculos Desarenador-Desengrasador aireado

<i>Desarenador-Desengrasador aireado</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	$Q_{\text{máx}}$	m ³ /h	1025,42	
Número de canales		ud	1,00	
Velocidad ascensional a caudal medio		m/h	15,00	
α_1		°	60,00	
α_2		°	80,00	
α_3		°	45,00	
h (nivel de agua en el vertedero para el Qdiseño)		m	0,10	
Retención de arenas		kg/m ³	0,02	
Peso diario de arenas extraídas		kg diarios	369,15	
Retención de grasas		kg/m ³	0,00	
Peso diario de grasas extraídas		kg diarios	49,22	
Longitud del desarenador		m	11,00	
Parámetro geométrico	a	m	5,00	
Parámetro geométrico	h	m	3,00	
Parámetro geométrico	h1	m	0,50	
Parámetro geométrico	h2	m	0,40	
Parámetro geométrico	h4	m	0,50	
Parámetro geométrico	x1	m	0,29	
Parámetro geométrico	x2	m	0,07	
Parámetro geométrico	x3	m	0,50	
Área triángulo 1	A1	m ²	0,07	
Área triángulo 2	A2	m ²	0,01	
Área triángulo 3	A3	m ²	0,13	
Área total unitaria	St	m ²	17,29	
Área total	A	m ²	17,29	
Volumen unitario		m ³	190,18	
Volumen total		m ³	190,18	
Velocidad de paso	vp	m/h	59,31	
Velocidad ascensional	vasc	m/h	18,64	

Tabla 31. Cálculos Tanque de homogenización

<i>Tanque de homogenización</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	$Q_{\text{máx}}$	m ³ /h	1025,42	
Velocidad de circulación		m/s	0,20	
Tiempo de retención hidráulico mínimo		minutos	15,00	
Calado		m	5,00	
Lado tanque cuadrado		m	8,00	
Volumen del tanque		m ³	320,00	
Tiempo de retención hidráulico calculado	TRH	minutos	18,72	



5.3 DECANTACIÓN PRIMARIA

Tabla 32. Cálculos Decantador primario rectangular

<i>Decantador primario rectangular</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{punta}	m ³ /h	1667,27	
Número de líneas	n	ud	4	
Rendimiento reducción DBO5		%	30%	
Rendimiento reducción SS		%	60%	
DBO5 afluente		mg/L	200	
SS afluente		mg/L	195	
Velocidad ascensional máxima a Q _{máx}		m/h	2,40	Tab 5-19
Velocidad ascensional a Q _{medio}		m/h	2,00	Tab 5-19
TRH a Q _{máx} (Tiempo de Retención Hidráulica)		hora	1,00	
TRH a Q _{medio}		hora	2,00	
Profundidad decantador		m	3,00	
Ancho decantador		m	5,00	
Constante. Tipo de material.	k	m/h	0,05	Shields
Densidad específica	s	[-]	1,25	Shields
Diámetro partículas	d	m	1,00E-04	Shields
Factor fricción Darcy-Weisbach	f	[-]	0,03	Shields
Velocidad arrastre	v _h	m/s	0,063	Shields
Velocidad horizontal Q _{max}	v	m/s	0,0309	Shields

<i>Sin lamelas</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Área requerida por decantador	a	m ²	173,67	
Longitud requerida		m	35,00	
TRH		h	1,25	

<i>Con lamelas</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	$Q_{máx}$	m ³ /h	1025,42	
Viscosidad cinemática agua 15°C	v	m ² /s	1,14E-06	
Densidad agua 15°C	γ	kg/m ³	999,10	
Densidad sólido	γ _s	kg/m ³	2650,00	
Ángulo lamelas respecto horizontal	θ	°	60,00	
Longitud lamelas	l	m	0,60	
Diámetro o lado del tubo	d	m	0,05	
Largo sección lamelar		m	10,00	
Longitud decantador	L _D	m	15,00	
Ancho sección lamelar		m	3,00	
Área decantador	A	m ²	75,00	
Volumen decantador	V	m ³	225,00	
Tiempo de retención hidráulica	TRH	h	0,88	
Velocidad paso módulos		m/s	2,74E-03	
Velocidad paso módulos		m/h	9,87	
Velocidad ascensional sobre los módulos	V _{asc}	m/h	8,55	
Reynolds	Re	[-]	120,32	Laminar
Velocidad crítica sedimentación	v _s	m/h	1,92	Yao [4], Ec. 1



<i>Parámetros efluente</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{med}	m ³ /h	833,63	
DBO5		mg/L	140,00	
SS en agua efluente		mg/L	78,00	
Sólidos al digestor		kg SS/día	2340,84	
Concentración sólidos en fango primario		kg SS _T /m ³	15,00	Wang [3]
Volumen diario de fango primario		m ³ /día	156,06	

5.4 REACTOR BIOLÓGICO

5.4.1 CÁLCULO SEGÚN MODELOS CINÉTICOS

5.4.1.1 ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA

Parámetros cinéticos

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	$Q_{máx}$	m ³ /h	1025,42	
¿Nitrificación?	-	Sí	-	-
Temperatura fluido	t	°C	15,00	-
Tiempo de retención de sólidos (Edad del fango). Eliminación DBO.	SRT, θ_c	día	5,00	-
Oxígeno disuelto en tanque aireación	OD	g/m ³	2,00	-
Tasa de síntesis de SSV (biomasa heterótrofa)	Y_H	g SSV/g sustr oxid	0,40	-
Tasa decaimiento organismos heterótrofos, 20°C	b_h	g SSV/g SSV·día	0,14	-
Tasa específica máxima de utilización de sustrato	k	g sustr /g SSV·día	8,00	Tab 7-8
Tasa específica máx de crecimiento bacteriano, 20°C	μ_m	g SSV/g SSV·día	6,00	Tab 8-14
Coeficiente de temperatura, μ_m, t	θ	-	1,07	Tab 8-14
Coeficiente de temperatura, b	θ	-	1,04	Tab 8-14
Concentración de SSt	X_{SSt}	g /m ³	4000,00	Tab 8-29
Tiempo de retención de sólidos (Edad del fango) de diseño	SRT, θ_c	día	12,60	-
Concentración de sustrato a la mitad de la tasa específica máxima de utilización de sustrato	K_s	g /m ³	8,00	-
Tasa decaimiento organismos heterótrofos, t	$b_{h,t}$	g SSV/g SSV·día	0,12	Eq 1-44
Tasa específica máxima de crecimiento bacteriano, t	$\mu_{m,t}$	g SSV/g SSV·día	4,28	-

Eliminación de DQO y producción de fango

Concentración sustrato influente (DQOb)	S_0	g /m	224,00	-
Concentración sustrato efluente (DQOb)	S	g /m ³	0,38	Eq 7-46
Sustrato eliminado	$S_0 - S$	g /m ³	223,62	-
Fracción de biomasa que permanece como detrito celular	f_d	g SSV/g SSV	0,15	Tab 8-14
Crecimiento de biomasa heterótrofa	-	kg SSV/día	898,52	Eq 8-20
Desecho celular	-	kg SSV/día	195,42	Eq 8-20
Producción de fango (biomasa)	$P_{X,Bio}$	kg SSV/día	1093,93	Eq 8-20
Producción fango SSV	$P_{X,SSV}$	kg SSV/día	1649,96	Eq 8-20
Producción fango SSt	$P_{X,SSt}$	[kg SSt/día]	2266,30	Eq 8-21
Masa SSV tanque aireación	-	kg	20790,25	Eq 7-57
Masa SSt tanque aireación	-	kg	28556,42	-



Diseño del reactor

Número de reactores	[-]	ud	2,00	-
Ancho del reactor	[-]	[m]	10,00	
Profundidad reactor (lámina agua)	[-]	[m]	5,00	
Tiempo de detención hidráulica	t	[horas]	6,96	-
Rendimiento observado consumiendo DQOb	-	g SSt prod/ g DQOb elimin	0,41	-
Rendimiento observado consumiendo DQOb	-	g SSv prod/ g DQOb elimin	0,20	-
Concentración SSvLM	SSvLM	g SSv/m ³	2912,16	-
Carga másica (Food to Microorganism Ratio)	C _m	g DBO5/g SSv·día	0,17	-
Carga volumétrica (Organic Volumetric Loading Rate)	C _v	g DBO5/m ³ ·día	482,61	-
Concentración de SSt en fango recirculado	XR _{SSt}	g /m ³	6500,00	Sec 8-3
Tasa de reciclaje del fango	R	Qretorno/Qentrada	0,72	-
Velocidad ascensional decantador secundario	V _{asc}	m/día	24,00	Tab 8-34
Área decantación secundaria	Ad _s	m ²	1025,42	-
Número decantadores secundarios	N _{ds}	-	3,00	-
Área decantador secundario	A	m ²	342,00	-
Diámetro decantador secundario	Ø	m	20,87	-
Carga de sólidos en el decantador secundario	SSL _m	kg SSL _m /m ² ·h	6,86	Tab 8-34
Volumen del tanque de aireación	V	m³	7139,10	-
Largo req zona aerobia	L	[m]	71,39	
Caudal recirculado	Q _R	m ³ /h	734,15	Eq 8-39

5.4.1.2 NITRIFICACIÓN

Parámetros cinéticos, nitrificación-desnitrificación

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q _{máx}	m ³ /h	1025,42	
Tasa de crecimiento bacterias oxidantes amonio	μ _{AOB,20°}	g SSv/g SSv·día	0,19	Eq 7-94
Tasa de crecimiento bacterias oxidantes nitrito	μ _{NOB}	g SSv/g SSv·día		Tab 8-14
Tasa máxima crecimiento bacterias oxidantes amonio	μ _{max, AOB, 20°}	g SSv/g SSv·día	0,90	Tab 8-14
Tasa máxima crecimiento bacterias oxidantes nitrito	μ _{max, NOB}	g SSv/g SSv·día	1,00	Tab 8-14
Tasa de decaimiento bacterias oxidantes amonio	b _{AOB, 20°}	g SSv/g SSv·día	0,17	Tab 8-14
Tasa de decaimiento bacterias oxidantes nitrito	b _{NOB}	g SSv/g SSv·día	0,17	Tab 8-14
Tasa de síntesis de SSv (biomasa nitrificante)	Y _n	g SSv/g sustr oxidado	0,15	Tab 8-14
Concentración efluente NH ₄ -N	S _{NH}	mg/L	0,50	-
Concentración NO ₂ -N	S _{NO}	mg/L		-
Concentración oxígeno disuelto	S _O	mg/L	2,00	-
Coef semi velocidad NH ₄ -N	K _{NH}	mg/L	0,50	Tab 8-14
Coef semi velocidad NO ₂ -N	K _{NO}	mg/L	0,20	Tab 8-14
Coef semi velocidad OD para AOB	K _{O, AOB}	mg/L	0,50	Tab 8-14
Coef semi velocidad OD para NOB	K _{O, NOB}	mg/L	0,90	Tab 8-14
Tasa de decaimiento bacterias oxidantes amonio, t	b _{AOB, t}	g SSv/g SSv·día	0,14	-
Tasa máx crecimiento bacterias oxidantes amonio, t	μ _{max, AOB, t}	g SSv/g SSv·día	0,64	-
Tasa de crecimiento bacterias oxidantes amonio, t	μ _{AOB, t}	g SSv/g SSv·día	0,12	-
Factor de seguridad nitrificación	FS	[-]	1,50	-
Tiempo teórico de retención de sólidos (Edad fango)	SRT, θ _c	días	8,40	Eq 7-98
Tiempo diseño de retención de sólidos (Edad fango). FS	SRT, θ _c	días	12,60	Eq 7-73
Carga másica (Food to Microorganism Ratio)	C _m	g DBO/g SSv·día	0,16	Eq 7-62



Carga volumétrica (Organic Volumetric Loading Rate)	C_v	g DBO/m ³ -día	473,22	Eq 7-69
Tasa de síntesis observada basada en SSt	$Y_{obs,SSt}$	g SSt prod/g DBO elim	32,76	-
Tasa de síntesis observada basada en SSv	$Y_{obs,SSv}$	g SSv prod/g DBO elim	18,67	-

Nitrificación

Concentración inicial de nitrato asumida	NO_x	mg/L	28,00	Eq 8-24
Crecimiento de biomasa heterotrofa	A	[kg SSv/día]	898,52	Eq 8-20
Desecho celular	B	[kg SSv/día]	195,42	Eq 8-20
Biomasa de bacterias nitrificantes	C	[kg SSv/día]	38,22	Eq 8-20
SSvnb	D	[kg SSv/día]	556,02	Eq 8-20
SSi	E	[kg SSv/día]	423,29	Eq 8-21
Producción biomasa	$P_{X,Bio}$	[kg SSv/día]	1132,16	Eq 8-20
Concentración de nitrato obtenida	NO_x	mg/L	28,98	Eq 8-24
Biomasa de bacterias nitrificantes. 1ª iteración.	C	[kg SSv/día]	39,56	Eq 8-20
Producción biomasa. 1ª iteración.	$P_{X,Bio}$	[kg SSv/día]	1133,50	Eq 8-20
Producción fango SSv	$P_{X,SSv}$	[kg SSv/día]	1689,52	Eq 8-20
Producción fango SSt	$P_{X,SSt}$	[kg SSt/día]	2311,27	Eq 8-21
Masa sólidos suspendidos volátiles en tanque aireación	SSvLM	kg	21288,73	Eq 7-56
Masa sólidos suspendidos totales en tanque aireación	SStLM	kg	29123,04	Eq 7-57
Concentración de sólidos en tanque aireación	X_{SSt}	g/m ³	4000,00	Tab 8-29

Diseño del reactor

Volumen necesario tanque aireación	V	m ³	7280,76	Eq 7-57
Número de tanques	n	[-]	3,00	-
Profundidad	[-]	m	5,00	-
Ancho	[-]	m	20,00	-
Largo	[-]	m	24,00	-
Volumen total dispuesto tanques aireación	V	m³	7200,00	
Tiempo detención hidráulica	t	horas	7,02	-
Concentración de sólidos volátiles en tanque aireación	X_{SSv}	g/m ³	2923,97	-

Necesidades de aireación

Demanda oxígeno	R_0	kg O ₂ /día	7152,96	Eq 8-23
Tasa de transferencia de oxígeno	SOTR	kg/h	716,51	Eq 5-55
Tasa de transferencia relativa al agua limpia	α	[-]	0,65	-
Saturación de OD relativa al agua limpia	β	[-]	0,95	-
Factor ensucimiento difusor	F	[-]	0,90	-
OD saturado a nivel mar, 20°	C_{s20°	mg/L	9,09	Tab E-1
OD saturado a nivel mar, t	C_{st}	mg/L	10,78	Tab E-1
OD saturado a nivel mar, 20°, aireación difusa	$C_{\infty 20^\circ}$	mg/L	10,67	U.S. EPA, 1989
Cota planta MSNM	z	m	500,00	-
Presión relativa	P_a/P_b	[-]	0,93	App B
Profundidad difusor	Df	m	4,50	-
Eficiencia de los difusores. Transferencia.	E	[%]	35,00%	-
Tasa de flujo de aire	[-]	m ³ /h	7582,09	-
Cudal operación difusor	Qa	m ³ /h	7,00	-
Nº difusores necesarios	n	[-]	1083,00	-



Área difusores	Aa	m ²	180,50	-
Alcalinidad requerida para nitrificación	Alk	g CaCO ₃ / g NH ₄ -N	206,91	Eq 7-91

5.4.1.3 DESNITRIFICACIÓN

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref* ⁴
Caudal de diseño	Q _{máx}	m ³ /h	1025,42	
Concentración de nitrato en recirculación fango	N _e	g/m ³	6,00	-
Energía agitación reactor anóxico	E	kW/m ³	5,00	-
Concentración biomasa activa	X _b	g/m ³	1572,46	Eq 7-42
Relación	IR	-	3,11	Eq 8-62
Flujo a zona anóxica	Q _a	m ³ /día	94254,34	-
Cantidad nitrato NO ₃ -N enviada zona anóxica	NO ₃ -N	g/día	565526,02	-
Tiempo detención zona anóxica	t	h	2,00	-
Volumen requerido zona anóxica	V _{an}	m ³	2050,83	-
Carga másica (Food to Microorganism Ratio)	C _m	g DBO/g SSV·día	1,07	Eq 8-56
Relación DQObs/DQOb	-	-	35,00%	-
Coeficiente SDNR	b ₀	-	0,24	Tab 8-22
Coeficiente SDNR	b ₁	-	0,14	Tab 8-22
Tasa desnitrificación específica a 20°	SDNR _{b,20}	g NO ₃ -N/g SSV·día	0,24	Eq 8-57
Coeficiente de temperatura, b	θ	[-]	1,026	Tab 8-14
Tasa desnitrificación específica a t	SDNR _{b,t}	g NO ₃ -N/g SSV·día	0,199	-
Ajuste por recirculación	SDNR _{adj}	g NO ₃ -N/g SSV·día	0,185	Eq 8-60
Tasa SDNR basada en SSV	SDNR	g NO ₃ -N/g SSV·día	0,10	-
Cantidad nitrato NO ₃ -N que puede ser reducido	NO _r	g/día	596774	Eq 8-51
Exceso capacidad de eliminación nitrato NO ₃ -N	-	-	5,53%	-
Cantidad O ₂ aportada por reducción del nitrato	O ₂	kg O ₂ /h	1617,40	Estequiometría
Alcalinidad producida	Alk	g CaCO ₃ / g NH ₄ -N	82,04	Estequiometría
Alcalinidad necesaria PH≈7	Alk	g CaCO ₃ / m ³	70,00	-
Alcalinidad a añadir	Alk	g CaCO ₃ / m ³	54,88	-
Alcalinidad a añadir	Alk	kg CaCO ₃ / día	1350,52	-
Número de tanques	n	[-]	2,00	
Profundidad	[-]	m	5,00	-
Ancho	[-]	m	9,00	-
Largo	[-]	m	23,00	-
Volumen total dispuesto tanques anóxicos	V	m ³	2070,00	-

5.4.1.4 ELIMINACIÓN DE FÓSFORO

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q _{máx}	m ³ /h	1025,42	
Concentración de nitrato en recirculación fango	N _e	g/m ³	6,00	-
Sustrato disponible	DQObs	kg [DQObs]/d	1929,42	-
Cantidad nitrato NO ₃ -N enviado zona anaerobia	NO ₃ -N	kg NO ₃ -N/d	105,72	-
Relación DQObs usada por NO ₃ -N	-	g [DQObs] / g [NO ₃ -N]	5,20	Eq 7-127
DQObs consumida por NO ₃ -N	-	kg [DQObs]/d	549,73	-

⁴ De [1] si no se indica otra cosa



DQObs disponible	-	kg [DQObs]/d	1379,69	-
Relación VFA/DQObs	-	-	0,19	-
Relación DQObs/P eliminado	-	g [DQObs]/ g [P]	15,00	Fig 8-38
Eliminación fósforo por PAOs	-	g/m³ [P]	5,23	Fig 8-38
				-
Tiempo detención zona anaerobia	t	h	1,00	Tab 8-29
Volmen zona anaerobia	V _{ana}	m ³	1025,42	Tab 8-30
Número de tanques	n	[-]	2,00	-
Profundidad	[-]	m	5,00	-
Ancho	[-]	m	9,00	-
Largo	[-]	m	11,40	-
Volumen total dispuesto tanques anaerobios	V	m³	1026,00	-

5.4.2 CÁLCULO SEGÚN MODELOS EMPÍRICOS

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q _{máx}	m ³ /h	1025,42	-
Número de reactores	[-]	ud	2,00	-
Carga másica	C _m	g DBO5/g SSV·día	0,10	-
Porcentaje de zona anóxica	[-]	[-]	0,42	Apuntes
Factor de seguridad nitrificación	FS	[-]	1,50	-
Porcentaje de zona anóxica destinada a anaerobia	[-]	[-]	0,25	Apuntes
Concentración SST salida decantador secundario	X _e	g/m ³	30,00	M&E, Correo
Ancho del reactor	[-]	[m]	10,00	
Profundidad reactor	[-]	[m]	5,00	
Concentración de SST	X _{Sst}	g /m ³	4000,00	Tab 8-29
Producción fango SST	P _f	[kg SST/kg DBO]	0,71	Huisken
DBO eliminada diariamente	[-]	[kg DBO/día]	2604,94	
Producción fango SST	P _{X,Sst}	[kg SST/día]	1840,68	
Tasa decrecimiento bacterias nitrificantes	K _{d-nitrif}	g SSV/g SSV·día	0,03	C.Cabo
Tasa crecimiento bacterias nitrificantes	K _{nitrif}	g SSV/g SSV·día	0,28	C.Cabo
Edad del fango	SRT, θ _c	día	14,74	C.Cabo
Comprobación nitrificación	[-]	[-]	0,55	C.Cabo
Resultado comprobación nitrificación	[-]	[-]	Cumple	C.Cabo
Porcentaje de zona anóxica destinada a anaerobia 1ª it			31,75%	
Caudal al espesador	Q _w	[m ³ /día]	207,46	Eq 8-28
Volumen reactor requerido. Incluye zona anóxica	V	m ³	7690,62	Apuntes
Volumen zona anóxica	V	m ³	3230,06	Apuntes
Volumen zona anaerobia	V	m ³	1025,42	Apuntes
Largo req zona anaerobia	L	[m]	10,25	
Largo req zona anóxica	L	[m]	32,30	
Largo req zona aerobia	L	[m]	44,61	
Largo total	L _{tot}	[m]	88,00	



5.5 DECANTACIÓN SECUNDARIA

<i>Decantador Secundario</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref
Caudal de diseño	Q_{\max}	m ³ /h	1025,42	
Número decantadores secundarios	Nds	-	4,00	-
Concentración de SS en fango recirculado	SS _{RS}	kg /m ³	6,50	Sec 8-3
Tasa de reciclaje del fango	R	Qretorno/Qentrada	0,72	-
Velocidad ascensional decantador secundario	V _{asc}	m/día	32,00	ATV-A131* y Tab 8-34
Velocidad ascensional decantador secundario	V _{asc}	m/hora	1,33	
Área decantación secundaria	Ads	m ²	769,06	-
Área decantador secundario	A	m ²	192,27	-
Diámetro decantador secundario	Ø	m	15,65	-
Carga de sólidos en el decantador secundario	SSLM	kg SSLM/m ² ·h	9,15	Tab 8-34
Volumen fango diluido	DSV	l/m ³	600,00	ATV-A131*
Tasa de carga de fango	q _{sv}	l/m ² ·h	460,80	ATV-A131*
Concentración SS fango de fondo	SS _{BS}	kg /m ³	8,40	ATV-A131*
Concentración SS entrada decantador	SS _{EAT}	kg /m ³	2,71	ATV-A131*
Índice volumen del fango	SVI	l/kg	150,00	ATV-A131*
Tiempo espesado	t _{Th}	h	2,00	ATV-A131*
Altura clarificación	h ₁	m	0,50	ATV-A131*
Altura separación	h ₂	m	2,86	ATV-A131*
Altura almacenamiento	h ₃	m	0,71	ATV-A131*
Altura espesamiento	h ₄	m	1,48	ATV-A131*
Altura total	htot	m	5,55	ATV-A131*
Rendimiento eliminación SS	-	%	95,00%	
Rendimiento eliminación ST	-		60,00%	

5.6 COAGULACIÓN, FLOCULACIÓN, DECANTACIÓN TERCIARIA

<i>Coagulación</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{\max}	m ³ /h	1025,42	
Número arquetas coagulación	[-]	ud	3,00	
Tiempo de retención arqueta mezcla rápida	TRH	s	45,00	Tab 5-9
Volumen requerido arqueta mezcla rápida	V _{coag}	m ³	4,27	
Profundidad arqueta mezcla rápida	h	m	1,80	
Lado arqueta mezcla rápida	L	m	1,50	
Potencia mínima necesaria	P	W	1671,17	Rushton
Densidad del agua	ρ	kg/m ³	1020,00	
Velocidad agitador	N	r.p.s	25,00	
Diámetro agitador	d	m	0,16	
Constante impulsor	k	[-]	1,00	
Reynolds en tanque	Re	[-]	610093,46	
Potencia real agitador	P	W	1100,00	
Gradiente de velocidad	G	1/s	604,61	
Dosis coagulante FeCl ₃	C	mg/L	39,82	Letterman
Dosis coagulante FeCl ₃	C	kg/día	796,71	



Concentración peso de la solución comercial		%	40,00%	
Gasto solución comercial		L/día	1991,77	
Volumen almacenamiento 15 días		m ³	29,88	
Diámetro tanque	Ø	m	3,00	
Altura tanque	h	m	4,23	

Floculación				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{máx}	m ³ /h	1025,42	
Número arquetas floculación	[-]	ud	3,00	
Tiempo de retención arqueta floculación	TRH	s	1800,00	Tab 5-9
Volumen requerido arqueta floculación	V _{coag}	m ³	170,90	
Profundidad arqueta floculación	h	m	2,50	
Lado arqueta floculación	L	m	8,30	
Potencia mínima necesaria	P	W	842,72	Rushton
Densidad del agua	ρ	kg/m ³	1020,00	
Velocidad agitador	N	r.p.s	0,40	
Diámetro agitador	d	m	1,50	
Constante impulsor	k	[-]	1,70	
Reynolds en tanque	Re	[-]	857943,93	
Potencia real agitador	P	W	1100,00	
Gradiente de velocidad	G	1/s	67,89	
Dosis sulfato de aluminio Al ₂ (SO ₄) ₃	C	mg/L	14,23	Letterman
Dosis coagulante FeCl ₃	C	kg/día	2,52	
Concentración peso de la solución comercial		%	40,00%	
Gasto solución comercial		L/día	6,30	
Volumen almacenamiento 15 días		m ³	0,09	
Diámetro tanque	Ø	m	3,00	
Altura tanque	h	m	0,01	
Rendimiento reducción SS _t (frac. Coloidal)		%	60%	

5.7 FILTRO DE ARENA

Filtro de arena

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{máx}	m ³ /h	1025,42	
Velocidad ascensional	V _{asc}	m/d	120,00	
Número de filtros		ud	3,00	
Largo		m	8,00	
Ancho		m	9,00	
Área requerida	A	m ²	205,08	
Área por filtro		m ²	68,36	
Altura lecho filtrante		m	0,75	
Diámetro medio grano	d ₅₀	mm	0,60	
Viscosidad dinámica agua	μ	N·s/m ²	0,00	
Talla efectiva	d ₁₀	mm	0,40	
Coef. Uniformidad	d ₆₀ / d ₁₀	[-]	1,50	
Factor forma				
Porosidad	α	%	0,40	
Esfericidad	ψ		0,81	



Coef. Arrastre	Cd	[-]	32,49	
Reynolds	RE	[-]	0,83	
Pérdida de carga inicial	h	m	0,41	Rouse [13]
Pérdida de carga final	h	m	3,00	

5.8 DESINFECCIÓN

Canal UV

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{máx}	m ³ /h	1025,42	
Longitud de la bombilla		cm	92,10	Catálogo
Diámetro de la bombilla		cm	1,50	
Absorbancia	A	1/cm	0,30	Tab 12-29
Distancia	x	cm	5,00	
Dosis propuesta de UV de referencia		μW/cm ²	35000,00	Apuntes
Potencia consumida		W	127,00	Catálogo
Potencia suministrada		W	42,00	Catálogo
Intensidad fuente	I ₀	μW/cm ²	96771,74	
Intensidad a distancia x	I ₁	μW/cm ²	3060,19	Beer, [19]
Tiempo necesario de contacto	t	s	11,44	
Velocidad máx paso por canal		m/s	0,20	
Ancho canal		m/s	1,20	
Volumen requerido (zona contacto)		m ³	3,26	
Profundidad Canal	c	m	1,20	
Longitud Canal (zona contacto)	L	m	2,26	
Velocidad de paso	v	m/s	0,20	CUMPLE

Disposición de lámparas

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Separación de lámparas		cm	5,00	
Diámetro de influencia		cm	11,50	
Área de influencia		cm ²	103,87	
Área de una lámpara		cm ²	1,77	
Área neta		cm ²	102,10	
Volumen ocupado por la luz		cm ³	9403,57	
Número de lámparas necesarias		ud	346,00	
Potencia total requerida		kW	43,94	

Resultado de la desinfección

Número inicial de microorganismos		UFC/100 ml	100000,00	
Número final de microorganismos		UFC/100 ml	0,01	Watson-Chick

Laberinto de cloración

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{máx}	m ³ /h	1025,42	
Tiempo mínimo de contacto	TRH	min	15,00	
Volumen canal requerido		m ³	256,35	
Profundidad Canal	c	m	1,00	



Ancho Canal	b		8,00	
Velocidad máx paso por calle		m/s	0,40	
Ancho y separación de calle	d	m	1,14	
Velocidad de paso	v	m/s	0,25	CUMPLE
Volumen de una calle		m ³	9,14	
Calles necesarias		ud	28,00	
Ancho murete		m	0,15	
Dosis Peróxido de Hidrógeno		mg/dm ³	15,00	
Dosis de Cloro		mg/dm ³	15,00	
Número inicial de microorganismos		UFC/100 ml	100000,00	
Número final de microorganismos		UFC/100 ml	0,68	Collins
Área en planta	A	m ²	289,60	

5.9 ESPESAMIENTO DE FANGO

Fango primario

Variables	Unidades	Valor	Ref
Concentración sólidos en fango	kg SS _T /m ³	15,00	M&E, Apuntes
Masa sólidos primario	kg/d	2340,84	-
Volumen fango diario (líquido)	m ³ /d	156,06	-

Fango secundario

Variables	Unidades	Valor	Ref
Concentración sólidos en fango	kg SS _T /m ³	6,50	M&E, Apuntes
Masa fango secundario	kg/d	1348,47	-
Volumen fango diario	[m ³ /día]	207,46	Eq 8-28

<i>Espesador por flotación</i>			
Variables	Unidades	Valor	Ref
Caudal de fango a espesador	m ³ /d	363,51	-
Masa de fango seco a espesador	kg/d	3689,31	-
Número de espesadores	ud	3,00	-
Diámetro	m	5,00	-
Calado recto	m	3,00	-
Inclinación solera	°	15,00	-
Concentración fango espesado	kg SS _T /m ³	30,00	-
Velocidad ascensional límite	m/h	2,00	-
Tiempo de retención mínimo	h	6,00	-
Área unitaria	m ²	19,63	-
Porcentaje de fango a digestor	%	90%	-
Área total	m ²	58,90	-
Velocidad ascensional calculada	m/h	0,26	-
Relación masa aire-sólidos	-		-
Caudal a digestor	m ³ /d	122,98	-
Caudal másico de fango a digestor	kg/d	3320,38	-
Caudal a reciclaje a Tto. Secundario	m ³ /d	240,54	-



5.10 DIGESTIÓN ANAEROBIA

Parámetros de entrada

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Caudal de diseño	Q_{red}	m ³ /h	833,63	
Número de digestores		ud	1,00	
Diámetro del digestor		m	5,00	
Altura digestor (zona de proceso)		m	10,00	
Velocidad ascensional límite		m/h	3,00	
Caudal de fango húmedo (volumen)		m ³ /d	122,98	
Caudal de fango húmedo (máscico)		kg/d	126666,33	
Caudal entrante sólidos		kg/d	3320,38	
Tiempo de retención de sólidos	SRT	día	40,00	
Destrucción de SSv durante digestión		%	60,00%	
Tasa carga orgánica	OLR	kg DQO/(m ³ ·d)	8,00	Tab 10-3
DQO entrada a planta	DQO	kg/m ³	0,51	
DQO salida de planta	DQO	kg/m ³	0,10	
Tasa DQO consumida por respiración endógena	kd	%	5,00%	
Tasa de eliminación de DQO en el reactor	-	g DQO eliminada/ g DQO afluente	0,90	
Concentración sustrato efluente digestor (DQO)	S	kg/m ³	6,22	
Tasa de síntesis de SSV (biomasa heterótrofa)	Y _H	g SSV/g sustr oxid	0,08	Tab 10-3
Tasa muerte organismos heterótrofos, 20°C	b _h	g SSV/g SSV·día	0,03	Tab 10-3
Fracción de biomasa que permanece como detrito celular	f _d	g SSV detrito/g SSV biomasa muerta	0,10	
Concentración media de sólidos volátiles objetivo en reactor	X	kg SSV/m ³	30,00	
Concentración media de sólidos volátiles en efluente	X _e	kg SSV/m ³	0,12	
Tasa de producción de metano en condiciones estándar		L CH ₄ / g DQO	0,35	Ej 7-10
Temperatura de diseño (mesófila)		°C	35,00	
Porcentaje de metano en el biogás			65,00%	
Calor específico del fango		J/kg·C°	4200,00	

Resultados

Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Área digestores		m ²	19,63	
Volumen disponible		m ³	196,35	
Velocidad ascensional calculada		m/h	0,26	Cumple
Carga SSv		kg SSv/(m ³ ·d)	16,91	
DQO entrante al digestor	DQO _e	kg/día	7654,76	
Concentración sustrato entrada digestor (DQO)	S ₀	kg/m ³	62,25	
Volumen por carga orgánica		m ³	956,84	Eq 10-20
Producción de biomasa heterótrofa	P _{X,H}	kg SSv/día	250,52	
Producción de detrito celular (biomasa)	P _{X,DC}	kg SSv/día	30,06	
Sólidos en suspensión volátiles no biodegradables (afluente)	SSVnb	kg SSv/día	6,75	
Producción diaria de fango	P _X	kg SSv/día	287,33	
Concentración media de sólidos volátiles obtenida a tiempo SRT	X	kg SSv/m ³	58,53	
Exceso de fangos diarios enviados a deshidratación	Q _w	m ³ /d	27,35	
Tasa DQO de la biomasa	DQO	kg DQO/ kg SSv	1,42	Eq 7-5
Producción de biomasa (fango activo)	P _{X,bio}	kg SSv/día	280,58	
DQO transformable en metano	CH ₄ DQO	kg/día	6490,85	
Producción de metano en condiciones estándar		m ³ /d	2271,80	



Factor de corrección por temperatura		-	1,13	
Producción de metano a temperatura		m ³ /d	2562,90	
Total biogás		m ³ /d	3942,92	
Alcalinidad requerida		g CaCO ₃ /m ³	2678,00	Tab 10-7
Alcalinidad diaria		kg CaCO ₃ /día	329,33	

Necesidad de calor del fango

Enero	q1	J/d	1,35E+10	J/s	156397,73	kW	156,40
Febrero	q2	J/d	1,29E+10	J/s	149624,60	kW	149,62
Marzo	q3	J/d	1,15E+10	J/s	133615,39	kW	133,62
Abril	q4	J/d	1,01E+10	J/s	116990,43	kW	116,99
Mayo	q5	J/d	8,19E+09	J/s	94823,82	kW	94,82
Junio	q6	J/d	5,80E+09	J/s	67115,56	kW	67,12
Julio	q7	J/d	4,52E+09	J/s	52337,82	kW	52,34
Agosto	q8	J/d	4,47E+09	J/s	51722,08	kW	51,72
Septiembre	q9	J/d	6,33E+09	J/s	73272,95	kW	73,27
Octubre	q10	J/d	8,51E+09	J/s	98518,26	kW	98,52
Noviembre	q11	J/d	1,16E+10	J/s	134231,12	kW	134,23
Diciembre	q12	J/d	1,32E+10	J/s	153319,04	kW	153,32

5.11 DESHIDRATACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE FANGOS

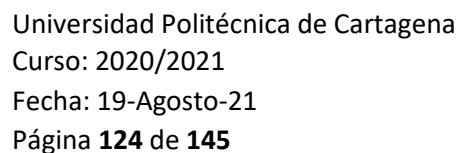
<i>Deshidrtación centrífuga</i>				
Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Ref*
Potencia equipo		kW	41,00	Fabricante
Unidades		Unidades	1,00	-
Concentración sólidos conseguida		kg/m ³	250,00	
Caudal recibido (líquido)	Q_w	m ³ /día	27,35	
Caudal sólidos	Q_w	kg/día	1600,72	
Eficiencia separación sólidos		[%]	90,00%	
Dosificación de polielectrolito		[g poli/ g sólidos]	0,60	
Consumo polielectrolito		kg/día	960,43	
Sólidos a almacenamiento		kg/día	1440,65	
Volumen a almacenamiento		m ³ /día	5,76	
Capacidad almacenamiento		días	5,00	
Capacidad almacenamiento		m ³	28,81	

5.12 GASÓMETRO, ANTORCHA Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

<i>Parámetros de entrada</i>			
Variables	Unidades	Valor	Ref
Caudal medio diario	m ³ /d	20007,20	-
Masa SS _T eliminada	kg SS _T /m ³	65,00	M&E, Apuntes
Producción de gas	Nm ³ /d		
Potencia turbina	kW	200,00	
Consumo combustible turbina	MJ/h	2400,00	
PCI metano	MJ/kg	50,00	
Eficiencia turbina	MJ/kWh	10,90	



Resultados			
Consumo de metano	kg/h	48,00	
Consumo de metano	kg/año	420480,00	
Consumo de metano	kg/kWh	0,22	
Paros por mantenimiento	[%]	10,00%	
Energía anual	kWh/año	1370064,00	



Variables	Símbolo	Unidades	Valor	Referencia
Caudal de diseño	Qpunta	m³/h	1667,27	
Caudal de diseño	Qpunta	m³/s	0,46	
Ancho del canal efluente	b	m	1,00	
Calado crítico	y _c	m	0,28	
Velocidad flujo efluente	vc	m/s	2,32	
Calado vertedero	y _b	m	0,20	Rouse

[illegible]



6 LISTADO DE EQUIPOS Y CONSUMOS

Tabla 34. Listado de equipos y consumos

Item	Equipo	Servicio en	Unidades	Potencia Unitaria [kW]	Potencia Instalada [kW]	Unidades funcionando	Horas funcionando	Energía [kWh/día]
1	Caudalímetro	Obra de Llegada	1	0,001	0,001	1	24	0,024
2	Polipasto + Cuchara	Pozo de gruesos	1	4	4	1	12	48
3	Bomba sumergible	Pozo de bombeo	3	17	51	2	20	680
4	Reja de gruesos automática	Desbaste	1	4	4	1	24	96
5	Cinta Transportadora rejas	Desbaste	1	2	2	1	24	48
6	Rototamiz	Desbaste	1	2	2	1	24	48
7	Cinta Transportadora Rototamiz	Desbaste	1	10	10	1	24	240
8	Soplantes desarenador	Desarenador	2	10	20	1	12	120
9	Bomba Soplante	Desarenador	1	10	10	1	24	240
10	Bomba de arenas	Desarenador	1	5	5	1	24	120
11	Motorreductores puentes desarenadores	Desarenador	1	3	3	1	24	72
12	Clasificador arenas	Desarenador	1	1	1	1	24	24
13	Concentrador grasas	Desarenador	1	1	1	1	24	24
14	Compuerta regulación caudal a biológico	Desarenador	1	5	5	1	24	120
15	Agitador balsa de homogenización	Homogenización	1	5	5	1	24	120
16	Bomba carga sosa	Homogenización	1	2	2	1	24	48
17	Resistencias sosa	Homogenización	1	2	2	1	24	48
18	Bomba dosificadora de sosa	Homogenización	1	2	2	1	24	48
19	Bomba carga acido	Homogenización	1	2	2	1	24	48
20	Bomba dosificadora acido	Homogenización	1	2	2	1	24	48
21	Soplantes producción aire	Homogenización	1	140	140	1	24	3360
22	Polipasto con motor eléctrico, sala soplantes	Homogenización	1	5	5	1	24	120
23	Motorreductores puentes	Desarenador	1	2	2	1	24	48
24	Bomba Flotantes		1	5	5	1	24	120
25	Bomba sumergible		1	5	5	1	24	120
26	Bomba sumergible		1	5	5	1	24	120
27	Soplantes producción aire	Biológico	4	20	80	1	24	480
28	Agitador cámara mezcla/tampón		1	5	5	1	24	120
29	Centrífuga	Deshidratación	1	41	41	1	12	492
30	Motor y ventilador traseros centrifugas	Deshidratación	1	2	2	1	24	48



31	Bomba para alimentación a la centrífuga	Deshidratación	1	2	2	1	24	48
32	Sist.autom. de preparación de poli		1	0,75	0,75	1	24	18
33	Bomba dosificadora poli		1	2	2	1	24	48
34	Tornillo transportador fanfos deshidratados		1	5	5	1	24	120
35	Bomba elevación de fango desh. a silo		1	5	5	1	24	120
36	Compuerta tolva fangos		1	1	1	1	24	24
37	Ventilador / Extractor		1	1	1	1	24	24
38	Polipasto con motor eléctrico	Salas bombeo	4	1	4	1	0,1	0,1
39	Agitador para mezcla	Terciario	1	1	1	1	24	24
40	Agitador para floculación	Terciario	1	1	1	1	24	24
41	Bomba dosificadora de Cloruro Férrico	Terciario	1	3	3	1	12	36
42	Bomba Trasvase	Terciario	1	5	5	1	6	30
43	Sist.autom. de preparación de poli	Terciario	1	1	1	1	24	24
44	Bomba dosificadora poli	Terciario	1	1	1	1	24	24
45	Bomba extracción fangos DEC Lamelar		1	2	2	1	24	48
46	Bomba alimentación filtro arena		4	12	48	1	24	288
47	Bomba lavado filtro arena		2	10	20	1	5	50
48	Bomba arrastre cloro limpieza		1	1	1	1	2	2
49	Bomba impulsión agua tratada a cabecera		1	1	1	1	12	12
50	Bomba dosificadora de HClO, desinf.previa		1	1	1	1	24	24
51	Bomba dosificadora de NaHClO		1	1	1	1	24	24
52	Bomba dosificadora de HClO		1	1	1	1	24	24
53	Equipo desinfección por UV	Terciario	1	43,94	43,942	1	24	1054,608
54	Grupo Presión Agua		1	5	5	1	24	120
55	Compresor Servicio Aire		1	5	5	1	24	120
56	Alumbrado, edificio y servicios		1	20	20	1	24	480
57	Transformador		1		0	1	24	0
58	Ventilador desodorización		1	1	1	1	24	24
59	Bomba recirculación desodorización		1	1	1	1	24	24
60	Bomba dosificadora NaClO desodorización		1	1	1	1	24	24
61	Bomba dosificadora NaOH desodorización		1	1	1	1	24	24
62	Bomba dosificadora H2SO4 desodorización		1	1	1	1	24	24
63	Intercambiador de calor	Digestor	1	0	0	3	24	0
64	Agitador mezcla rápida	Coagulación	3	1,1	3,3	3	24	79,2
Total				458				10278



7 COSTES DE EXPLOTACIÓN

Tabla 35. Preciario base costes explotación

Concepto	Unidades	Valor
Inversión inicial	[€]	8.000.000,00 €
Factor seguridad potencia contratada	-	1,50
Potencia contratada	[kW]	377
Energía anual contratada	[kWh/año]	2029807
Término de potencia	[€/(kW·año)]	24,00 €
Término de energía. Peaje	[€/kWh]	0,05 €
Variable energía	[€/kWh]	
Mantenimiento año 1	[% de la inversión inicial]	0,50%
Mantenimiento año 2	[% de la inversión inicial]	0,70%
Mantenimiento año 3	[% de la inversión inicial]	0,90%
Mantenimiento año 4	[% de la inversión inicial]	1,10%
Mantenimiento año 5	[% de la inversión inicial]	1,30%
Cloruro Férrico	[€/kg]	0,15 €
Polielectrolito aniónico	[€/kg]	3,50 €
Cloro	[€/kg]	-
Hidróxido sódico	[€/kg]	0,25 €
Jefe de Planta (media jornada)	[€/año]	20.000,00 €
Jefe Mantenimiento	[€/año]	30.000,00 €
Operador/Mantenimiento	[€/año]	25.000,00 €
Evacuación basura	[€/Tn]	15
Evacuación arena	[€/Tn]	9
Evacuación fango	[€/Tn]	25

Tabla 36. Costes explotación años 1 a 5

Concepto	Suma de Valor anual
Conservación	20.000,00 €
Electricidad	44.730,02 €
Personal	75.000,00 €
Reactivos	43.619,85 €
Total general	183.349,87 €

Concepto	Suma de Valor anual
Conservación	28.000,00 €
Electricidad	44.730,02 €
Personal	75.000,00 €
Reactivos	43.619,85 €
Total general	191.349,87 €

Concepto	Suma de Valor anual
Conservación	36.000,00 €
Electricidad	44.730,02 €
Personal	75.000,00 €
Reactivos	43.619,85 €
Total general	199.349,87 €

Concepto	Suma de Valor anual
Conservación	44.000,00 €
Electricidad	44.730,02 €
Personal	75.000,00 €
Reactivos	43.619,85 €
Total general	207.349,87 €

Concepto	Suma de Valor anual
Conservación	52.000,00 €
Electricidad	44.730,02 €
Personal	75.000,00 €
Reactivos	43.619,85 €
Total general	215.349,87 €



8 PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

8.1 UNIDADES DE PROCESO

01.01 Línea de agua

01.01.01 Obra de llegada y pretratamiento

01.01.01.19 Equipos electromecánicos

01.01.01.08 u Rejas desbaste automáticas

Total cantidades alzadas 5,00

5,00
10.000,00 50.000,00

01.01.01.10 u Cuchara bivalva 250 litros

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
12.000,00 12.000,00

01.01.01.11 u Polipasto 2 Tn

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
2.500,00 2.500,00

01.01.01.13 u Cinta de recogida automática

Total cantidades alzadas 2,00

2,00
5.000,00 10.000,00

01.01.01.14 u Compuerta motorizada

Total cantidades alzadas 3,00

3,00
2.500,00 7.500,00

01.01.01.15 u Contenedores recogida

Total cantidades alzadas 3,00

3,00
2.500,00 7.500,00

01.01.01.16 u Puente desarenador

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
100.000,00 100.000,00

01.01.01.17 u Bomba dosificadora

Total cantidades alzadas 3,00

3,00



01.01.01.18	u	Agitador sumergible homogenización	5.000,00	15.000,00
		Total cantidades alzadas	2,00	
			2,00	
01.01.01.10	u	Sistema aireación	5.000,00	10.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
01.01.01.11	u	Clasificador de arenas	50.000,00	50.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
01.01.01.12	u	Bombeo elevación pretratamiento	20.000,00	20.000,00
		Total cantidades alzadas	3,00	
			3,00	
			28.000,00	84.000,00
TOTAL 01.01.01.19			368.500,00	



01.01.04.16 u Sensor PH

Total cantidades alzadas 1,00

01.01.04.17 u Sensor Conductividad

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

1,00
1.200,00 1.200,00

TOTAL 01.01.01.04
.....**11.600,00**

TOTAL 01.01.01
.....**571.051,50**



01.01.02 Tratamiento primario

01.01.01.04 Instrumentos

01.01.01.12 u Caudalímetro

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
8.000,00 8.000,00

01.01.04.15 u Sensor de nivel

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

01.01.04.16 u Sensor PH

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

01.01.04.17 u Sensor Conductividad

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

TOTAL 01.01.01.04
.....11.600,00

01.01.02.07 Equipos electromecánicos T.Primario

01.01.02.08 u Sistema barrido fango

Total cantidades alzadas 4,00

4,00
30.000,00 120.000,00

TOTAL 01.01.02.07
.....120.000,00

01.01.02.06 Obra Civil T.Primario

01.01.01.05 m³ Rellenos prestamos
Medición

UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA
	10,00	2,00	5,00
			100,00
		Subtotal	100,00

100,00
26,00 2.600,00

01.01.01.01 m² Limpieza y desbroze
Medición

UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA
	30,00	30,00	900,00
		Subtotal	900,00

900,00



01.01.01.02	m³ Excavación maquinaria Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	2,00	1.800,00
			30,00	30,00	2,00		1.800,00
						Subtotal	1.800,00

01.01.01.03	m³ Estructuras hormigón Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	1.800,00 6,00	10.800,00
	Decantador losa	4	15,40	3,40	0,30		62,83
	Decantador muros largos	8	15,40	0,30	4,50		166,32
	Decantador muros cortos	8	3,40	0,30	4,50		36,72
	Separador	8	3,40	0,25	3,50		23,80
						Subtotal	289,67

01.01.01.06	m Tubería (p.p. pasamuros, bridas, válvulas y conexiones) Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	289,67 450,00	130.351,50
		3	30,00				90,00
						Subtotal	90,00

01.01.01.02.05	kg Estructuras metálicas (auxiliar y soportación) Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	90,00 450,00	40.500,00
			2.500,00				2.500,00
						Subtotal	2.500,00

01.01.02.03.07	m² Módulos lamelares Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	2.500,00 3,00	7.500,00
		3	10,00	3,00			90,00
						Subtotal	90,00

TOTAL 01.01.02.06
.....200.301,50

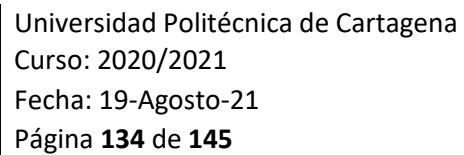
TOTAL 01.01.02
.....331.901,50

01.01.03 Tratamiento secundario

01.01.03.10 Obra Civil T.Secundario

01.01.01.01 m² Limpieza y desbroze
Medición

UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA
	150,00	45,00	6.750,00
		Subtotal	6.750,00





			4,00	
			12.000,00	48.000,00
01.01.03.09	u	Puente decantador		
		Total cantidades alzadas	4,00	
			4,00	
			35.000,00	140.000,00
TOTAL 01.01.03.06			388.000,00	
01.01.03.04	Instrumentos T.Secundario			
01.01.01.12	u	Caudalímetro		
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
			8.000,00	8.000,00
01.01.04.15	u	Sensor de nivel		
		Total cantidades alzadas	2,00	
			2,00	
			1.200,00	2.400,00
01.01.04.16	u	Sensor PH		
		Total cantidades alzadas	2,00	
			2,00	
			1.200,00	2.400,00
01.01.04.17	u	Sensor Conductividad		
		Total cantidades alzadas	2,00	
			2,00	
			1.200,00	2.400,00
TOTAL 01.01.03.04			15.200,00	
TOTAL 01.01.03			1.319.028,50	
01.01.04	Tratamiento terciario			
01.01.04.09	Obra Civil T.Terciario			
01.01.01.01	m²	Limpieza y desbroze		
		Medición		
			UDS	LONGITUD
			ANCHURA	ALTURA
			125,00	20,00
				2.500,00
			Subtotal	2.500,00
			2.500,00	
			2,00	5.000,00
01.01.01.02	m³	Excavación maquinaria		



Medición		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
			125,00	20,00	1,50	3.750,00	
						Subtotal	3.750,00
							3.750,00
01.01.01.03	m³ Estructuras hormigón					6,00	22.500,00
	Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
	Decantador losa	4	15,40	3,40	0,30	62,83	
	Decantador muros largos	8	15,40	0,30	4,50	166,32	
	Decantador muros cortos	8	3,40	0,30	4,50	36,72	
	Separador	8	3,40	0,25	3,50	23,80	
	Canal cloración		350,00			350,00	
						Subtotal	639,67
							639,67
01.01.01.05	m³ Rellenos prestamos					450,00	287.851,50
	Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
			10,00	2,00	5,00	100,00	
						Subtotal	100,00
							100,00
01.01.01.06	m Tubería (p.p. pasamuros, bridas, válvulas y conexiones)					26,00	2.600,00
	Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
		4	150,00			600,00	
						Subtotal	600,00
							600,00
01.01.01.02.05	kg Estructuras metálicas (auxiliar y soportación)					450,00	270.000,00
	Medición	UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
			2.500,00			2.500,00	
						Subtotal	2.500,00
							2.500,00
01.01.04.01.07	u Emisario					3,00	7.500,00
	Total cantidades alzadas						1,00
							1,00
						50.000,00	50.000,00
TOTAL 01.01.04.09							645.451,50
01.01.04.20	Equipos Electromecánicos T.Terciario						
01.01.02.08	u Sistema barrido fango						
	Total cantidades alzadas						3,00
							3,00



01.01.04.10	u	Bomba elevación filtro arena	30.000,00	90.000,00
		Total cantidades alzadas	3,00	
			3,00	
01.01.04.11	u	Agitador mezcla rápida	10.000,00	30.000,00
		Total cantidades alzadas	3,00	
			3,00	
01.01.04.12	u	Agitador mezcla lenta (floculación)	8.000,00	24.000,00
		Total cantidades alzadas	3,00	
			3,00	
01.01.04.13	u	Bomba dosificadora	8.000,00	24.000,00
		Total cantidades alzadas	4,00	
			4,00	
01.01.04.14	u	Depósito de reactivos	5.000,00	20.000,00
		Total cantidades alzadas	2,00	
			2,00	
01.01.04.19	u	Filtro arena	20.000,00	40.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
01.01.04.02.08	u	Canal radiación UV	20.000,00	20.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
			150.000,00	150.000,00
TOTAL 01.01.04.20			398.000,00	



01.01.04.07 Instrumentos T.Terciario
01.01.04.15 u Sensor de nivel

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

01.01.04.16 u Sensor PH

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

01.01.04.17 u Sensor Conductividad

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
1.200,00 1.200,00

01.01.04.18 u Caudalimetro

Total cantidades alzadas 1,00

1,00
8.000,00 8.000,00

TOTAL 01.01.04.07
.....11.600,00

TOTAL 01.01.04
.....1.055.051,50

TOTAL 01.01
.....3.277.033,00

01.02 Línea de fango

01.02.01 Bomba impulsión fango

Total cantidades alzadas 8,00

8,00
12.000,00 96.000,00

01.01.01.06 m Tubería (p.p. pasamuros, bridas, válvulas y conexiones)

Total cantidades alzadas 1.500,00

1.500,00
450,00 675.000,00

01.01.01.03 m³ Estructuras hormigón
Medición

UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA

Arquetas homogenización/recirculación
Espesadores muros
Reactor UASB
Caseta de bombas
Espesadores losas

3	15,70	0,40	3,00	56,52
1	15,00	0,40	5,00	30,00
4	5,00	0,30	5,00	30,00
3	20,00	0,40		24,00



		Subtotal	140,52	
			140,52	
01.01.01.04	Instrumentos		450,00	63.234,00
	Descomposición:			
	01.01.01.12 u Caudalímetro		1,00	
	8.000,00 8.000,00			
	01.01.04.15 u Sensor de nivel		1,00	
	1.200,00 1.200,00			
	01.01.04.16 u Sensor PH		1,00	
	1.200,00 1.200,00			
	01.01.04.17 u Sensor Conductividad		1,00	
	1.200,00 1.200,00			
	Total cantidades alzadas		1,00	
			1,00	
01.02.05	u Calorifugado reactor UASB		11.600,00	11.600,00
	Total cantidades alzadas		1,00	
			1,00	
01.02.06	u Equipo deshidratación centrífuga		120.000,00	120.000,00
	Total cantidades alzadas		1,00	
			1,00	
01.01.01.17	u Bomba dosificadora		150.000,00	150.000,00
	Total cantidades alzadas		4,00	
			4,00	
01.01.01.01	m² Limpieza y desbroze		5.000,00	20.000,00
	Medición			
	UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA			
	160,00 20,00		3.200,00	
		Subtotal	3.200,00	
			3.200,00	
01.01.01.02	m³ Excavación maquinaria		2,00	6.400,00
	Medición			
	UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA			
	160,00 20,00 1,50		4.800,00	
		Subtotal	4.800,00	
			4.800,00	
01.02.10	u Compresor espesador por flotación		6,00	28.800,00
	Total cantidades alzadas		1,00	
			1,00	



01.02.11	u Depósito mezcla presurizada				12.000,00	12.000,00
	Total cantidades alzadas				1,00	
					1,00	
01.01.02.08	u Sistema barrido fango				50.000,00	50.000,00
	Total cantidades alzadas				3,00	
					3,00	
01.01.01.02.05	kg Estructuras metálicas (auxiliar y soportación)				30.000,00	90.000,00
	Medición					
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	
			10.000,00			10.000,00
				Subtotal		10.000,00
					10.000,00	
					3,00	30.000,00

TOTAL 01.02

.....1.353.034,00

01.03 Línea de gas

01.01.01.01	m² Limpieza y desbroze					
	Medición					
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	
			30,00	20,00		600,00
				Subtotal		600,00
					600,00	
01.01.01.02	m³ Excavación maquinaria				2,00	1.200,00
	Medición					
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	
			30,00	20,00	1,50	900,00
				Subtotal		900,00
					900,00	
01.01.01.03	m³ Estructuras hormigón				6,00	5.400,00
	Medición					
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA	
	Total hormigón		350,00			350,00
				Subtotal		350,00
					350,00	
01.01.01.04	Instrumentos				450,00	157.500,00
	Descomposición:					
	01.01.01.12 u Caudalímetro				1,00	
	8.000,00				8.000,00	
	01.01.04.15 u Sensor de nivel				1,00	
	1.200,00				1.200,00	
	01.01.04.16 u Sensor PH				1,00	
	1.200,00				1.200,00	
	01.01.04.17 u Sensor Conductividad				1,00	
	1.200,00				1.200,00	



Medición		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
		2.000,00				2.000,00	
					Subtotal	2.000,00	
Total cantidades alzadas						-1.999,00	
01.01.01.05	m³ Rellenos prestamos Medición					1,00	
						11.600,00	11.600,00
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
		10,00	2,00	5,00		100,00	
					Subtotal	100,00	
01.01.01.06	m Tubería (p.p. pasamuros, bridas, válvulas y conexiones) Medición					100,00	
						26,00	2.600,00
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		
		1	500,00			500,00	
					Subtotal	500,00	
01.03.07	u Gasómetro					500,00	
						450,00	225.000,00
Total cantidades alzadas						1,00	
01.03.08	u Antorcha					1,00	
						120.000,00	120.000,00
Total cantidades alzadas						1,00	
01.03.09	u Intercambiador de calor					1,00	
						80.000,00	80.000,00
Total cantidades alzadas						1,00	
01.03.10	u Microturbina 200 kW					1,00	
						90.000,00	90.000,00
Total cantidades alzadas						1,00	
01.03.11	u Unidad Tratamiento Biogás					1,00	
						350.000,00	350.000,00
Total cantidades alzadas						1,00	
01.01.01.02.05	kg Estructuras metálicas (auxiliar y soportación) Medición					1,00	
						150.000,00	150.000,00
		UDS	LONGITUD	ANCHURA	ALTURA		



10.000,00 10.000,00

Subtotal 10.000,00

10.000,00
3,00 30.000,00

TOTAL 01.03

.....1.223.300,00

01.04 SCADA y automatización

TOTAL 01.04

.....150.000,00

TOTAL 01

.....6.003.367,00



8.2 Urbanización y Edificación complementaria

02.01	m ² Pavimentación calzada Medición	UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA			
		1.000,00	5,00	5.000,00	
				Subtotal	5.000,00
				5.000,00	
				12,00	60.000,00
02.02	u Sistema Solar Fotovoltaico Descomposición:				
	02.18.01 u MÓDULO SOLAR FOTOVOLTAICO 400W			600,000	
	160,00 96.000,00				
	02.18.02 u INVERSOR 40 kW			6,000	
	4.000,00 24.000,00				
	02.18.03 m CONDUCTOR DE CU DE 16 MM2			1.200,000	
	3,50 4.200,00				
	02.18.04 m CONDUCTOR DE CU DE 4 MM2			4.000,000	
	0,60 2.400,00				
	01.01.01.04 Instrumentos			1,000	
	11.600,00 11.600,00				
	Total cantidades alzadas			1,00	
				1,00	
				138.200,00	138.200,00
02.03	u Centro de Seccionamiento L.S.M.T. Compañía				
	Total cantidades alzadas			1,00	
				1,00	
				30.000,00	30.000,00
02.04	u Jardinería				
	Total cantidades alzadas			1,00	
				1,00	
				5.000,00	5.000,00
02.05	u Alumbrado exterior				
	Total cantidades alzadas			1,00	
				1,00	
				60.000,00	60.000,00
02.06	u Centro de Reparto y Medida L.S.M.T.				
	Total cantidades alzadas			1,00	
				1,00	
				40.000,00	40.000,00
02.07	u Transformador trifásico 1250 kVA				
	Total cantidades alzadas			1,00	
				1,00	
				15.000,00	15.000,00
02.08	u Edificio de control				



		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
02.09	u	Nave pretratamiento	270.000,00	270.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
02.10	u	Red eléctrica B.T.	200.000,00	200.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
02.11	u	Red de pluviales y aguas negras	100.000,00	100.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
02.12	m	Vallado perimetral y accesos	50.000,00	50.000,00
		Medición		
		UDS LONGITUD ANCHURA ALTURA		
		550,00	550,00	
		Subtotal	550,00	
			550,00	
02.13	u	Sistema videovigilancia	150,00	82.500,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
02.14	u	Laboratorio completo	30.000,00	30.000,00
		Total cantidades alzadas	1,00	
			1,00	
			200.000,00	200.000,00
TOTAL 02				
.....				1.280.700,00



8.3 GESTIÓN DE RESIDUOS

TOTAL 0360.000,00

8.4 PUESTA EN MARCHA

04.01 d Coste fijo por día

Total cantidades alzadas 250,00
250,00
600,00 150.000,00

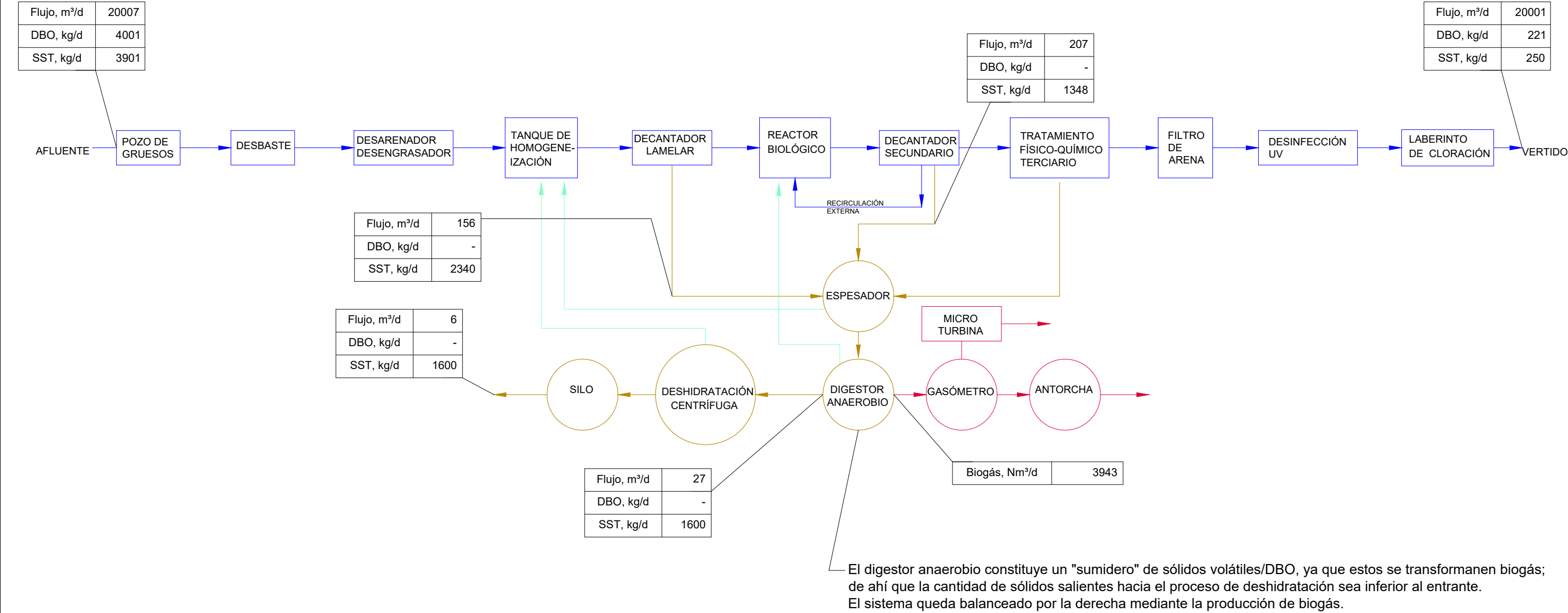
TOTAL 04150.000,00

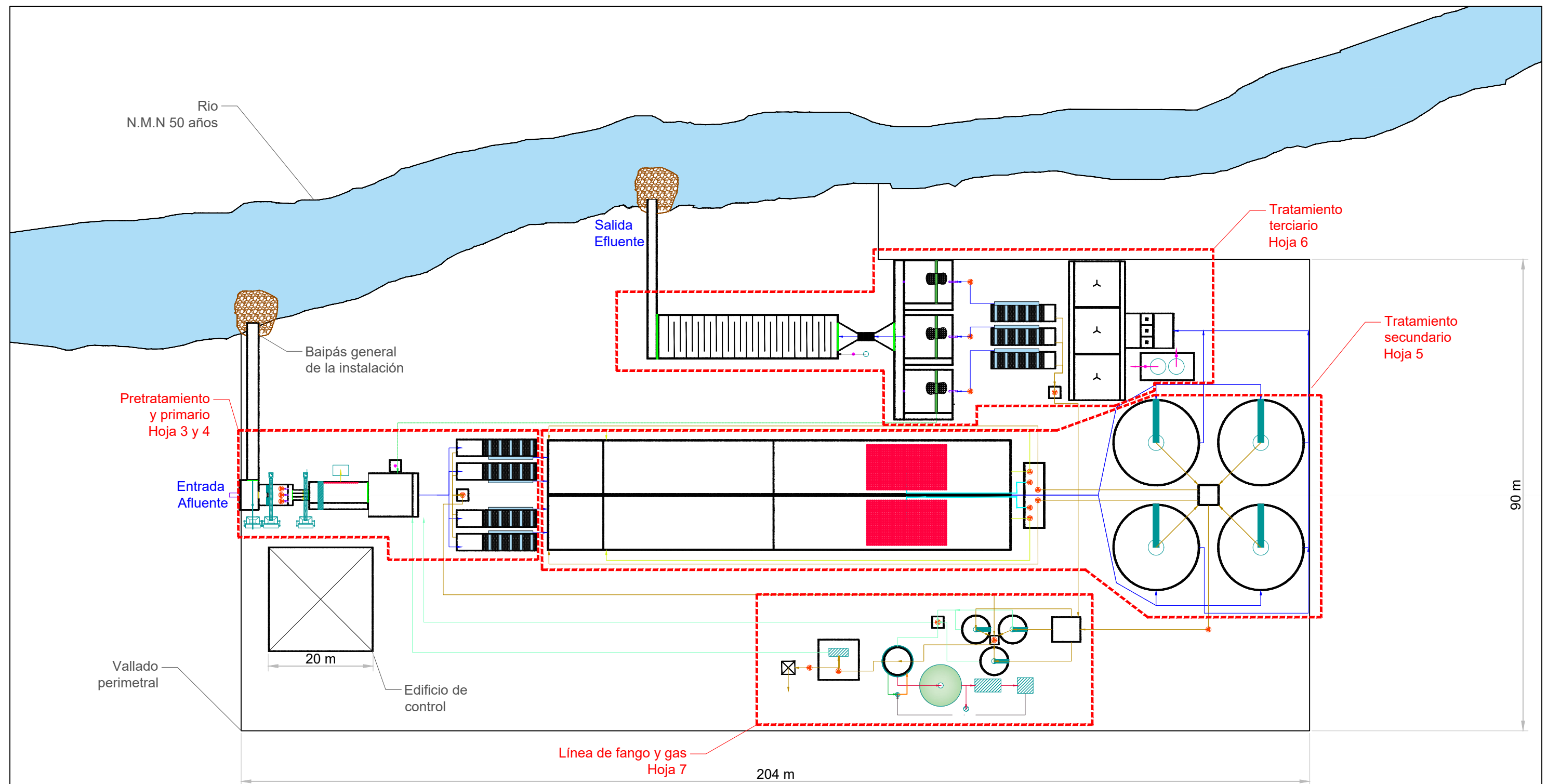
8.5 SEGURIDAD Y SALUD


TOTAL 0550.000,00

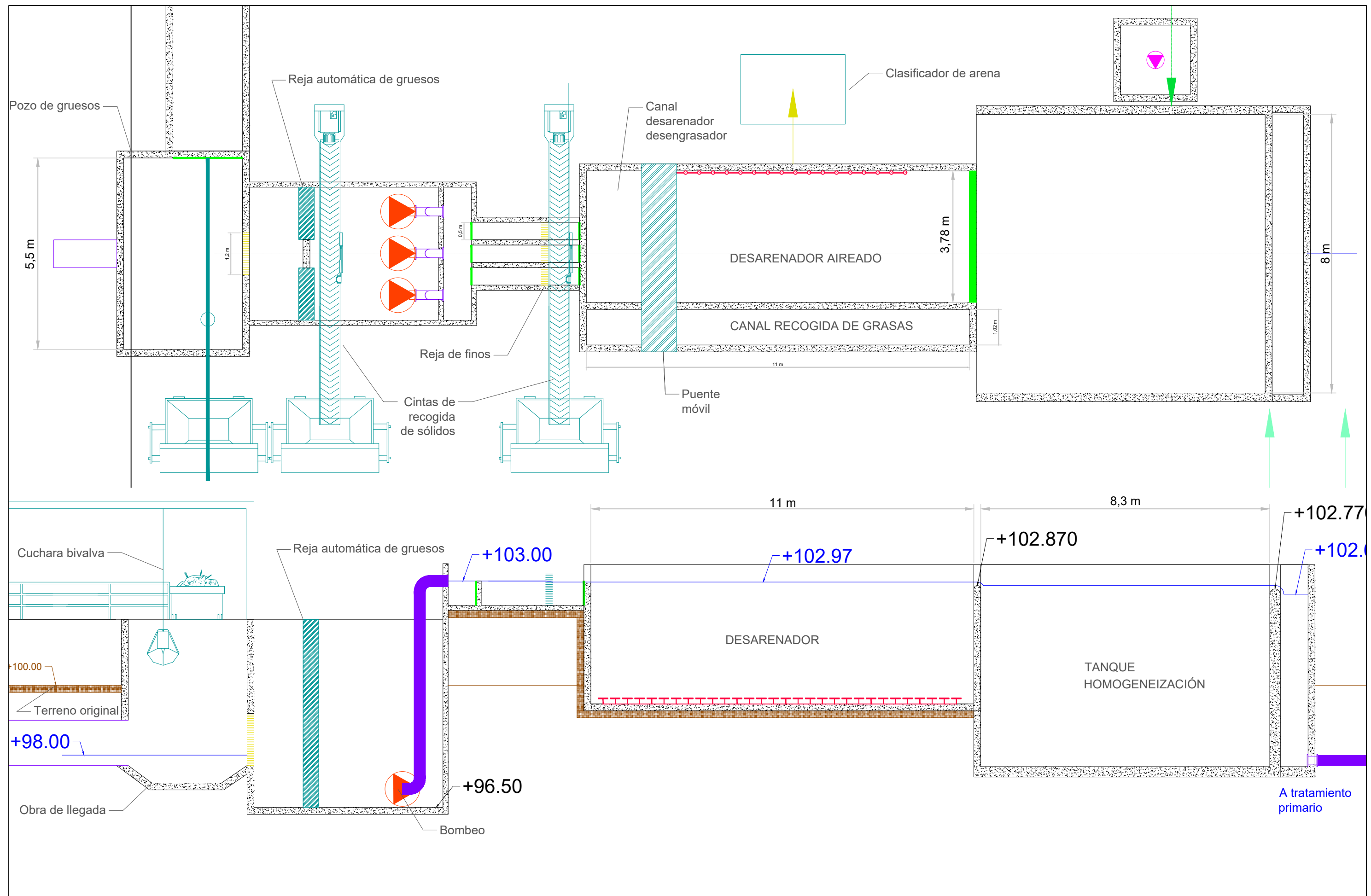
TOTAL
7.544.067,00

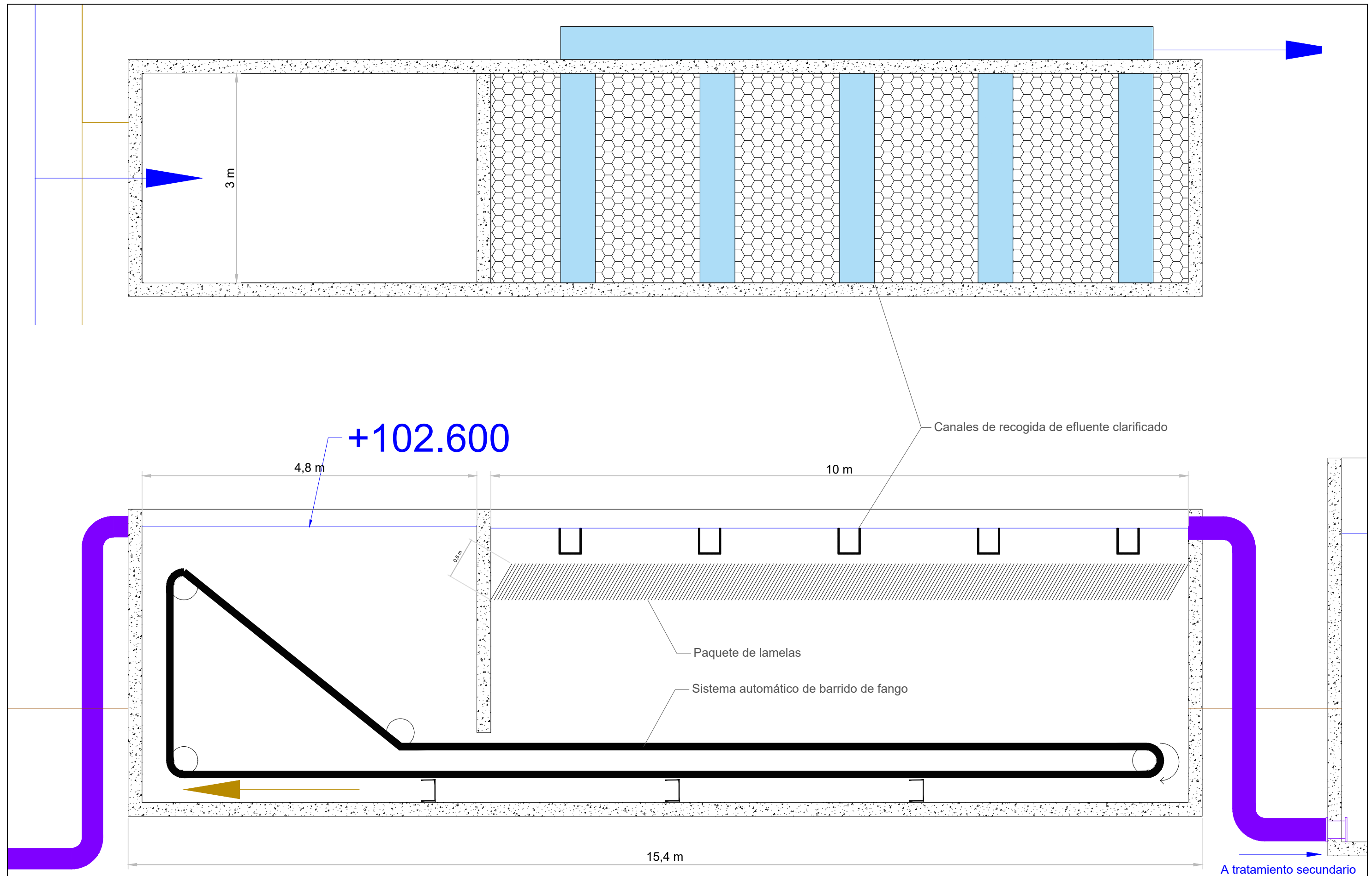
9 PLANOS




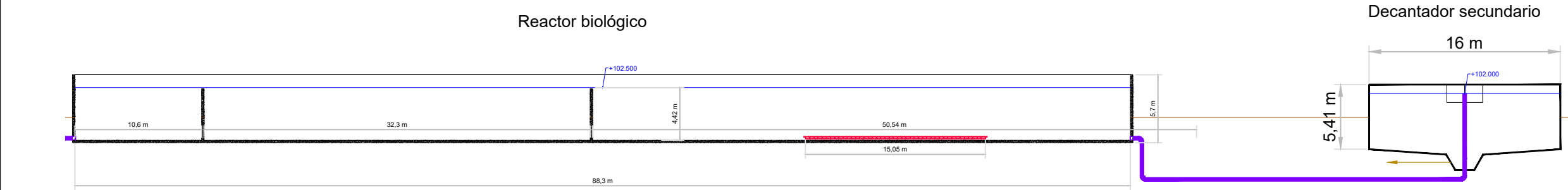
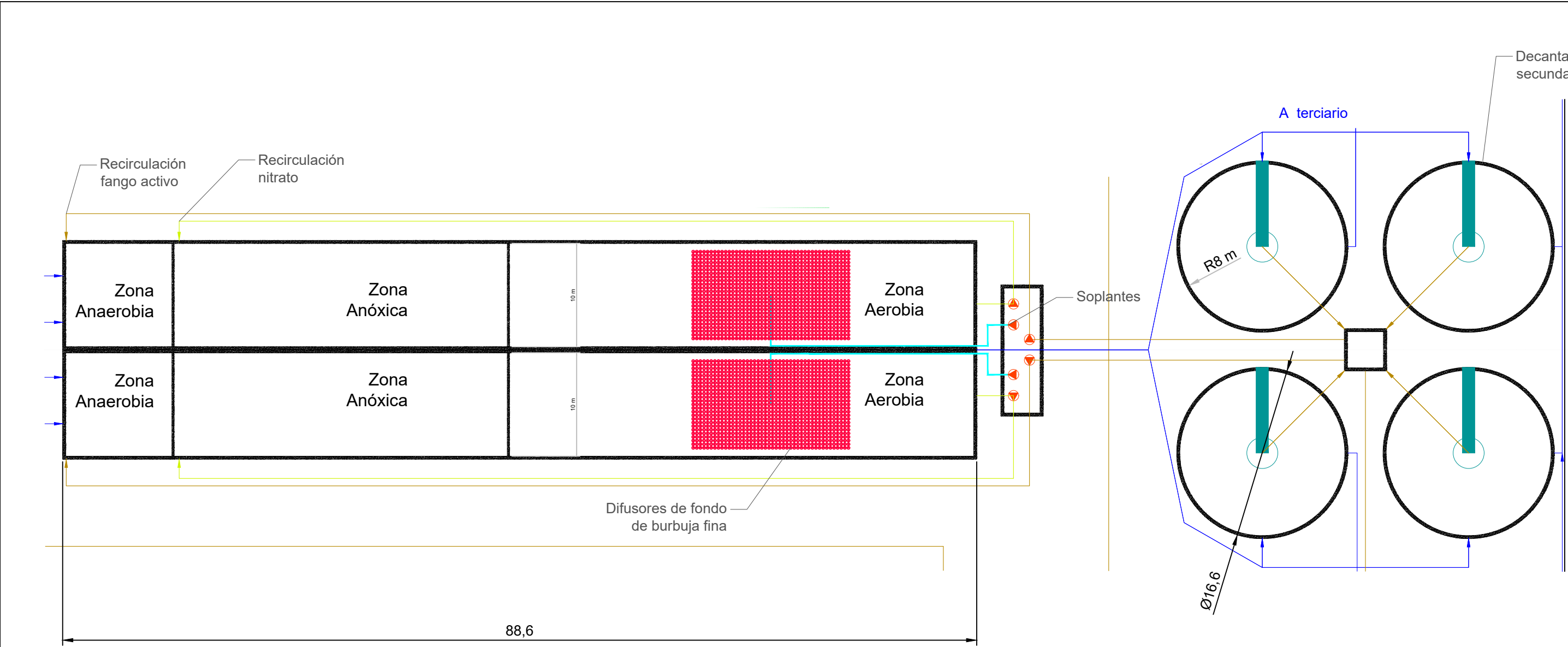


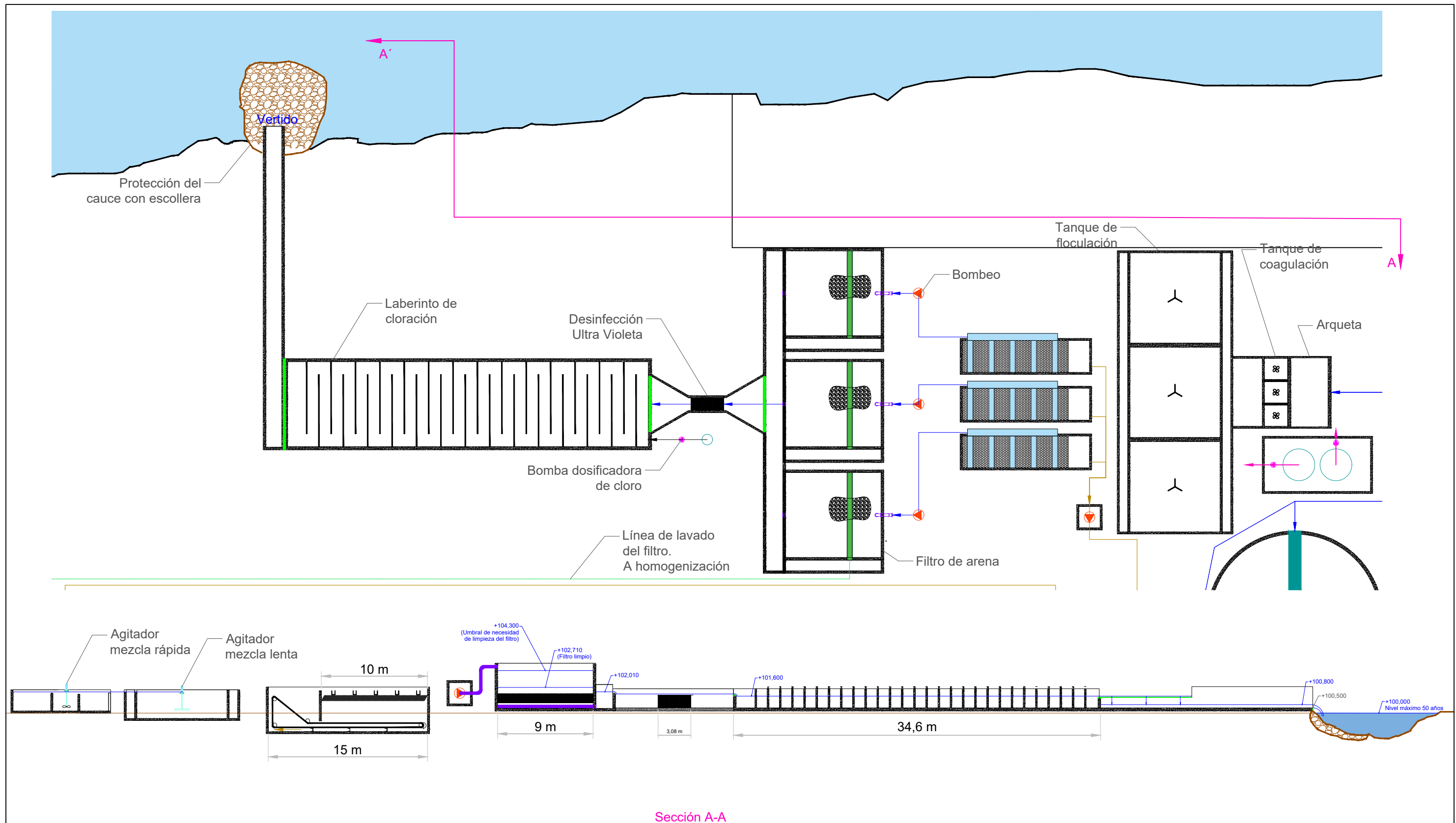
 Universidad Politécnica de Cartagena	Titulación: Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos	Alumno: Javier García García	Nombre del plano: Diagrama de proceso con balance de masas	Fecha: 20 - Agosto -2021	Rev: 0
	Asignatura: TFM	Proyecto: Diseño conceptual EDAR		Formato: DIN A3	Hoja: 2 de 7





 Universidad Politécnica de Cartagena	Titulación: Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos	Alumno: Javier García García	Nombre del plano: Tratamiento primario	Fecha: 20 - Agosto -2021	Rev: 0
	Asignatura: TFM	Proyecto: Diseño conceptual EDAR		Formato: DIN A3 Escala 1:150	Hoja: 4 de 8





Sección A-A

